



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL ELÉCTRICO

Título del proyecto:

*“CONSTRUCCIÓN Y ESTUDIO DE UN
PEQUEÑO AEROGENERADOR DE IMANES
PERMANENTES.”*

Alumno: Enrique Faci Cantero

Tutor: D. Jesús López Taberna

Pamplona, Mayo 2011

Agradecimientos

Quiero dedicar este proyecto a mi familia, muy especialmente a mi abuela Pilar que falleció durante la realización del mismo.

Y agradecer a todos los que de una u otra manera han colaborado en la realización, compañeros, y en especial a mi tutor Jesús López por sus incesantes y valiosas indicaciones que han contribuido a que este proyecto tenga el aspecto final que presenta.

CAPÍTULO 1.....	9
1.1 INTRODUCCIÓN.....	10
1.2. OBJETO.	10
1.3. ANTECEDENTES.	11
1.3.1 <i>Dificultades de acceso a la energía.</i>	11
1.3.1.1 Precio de la electricidad.	11
1.3.1.2 Alternativas energéticas.	12
1.3.2 <i>El papel de la Energía en el desarrollo.</i>	12
1.3.3 <i>La alternativa de la eólica de baja potencia.</i>	13
1.3.3.1 Aerogeneradores pequeños para el desarrollo rural.	13
1.3.3.2 Construcción de un aerogenerador de imanes permanentes.	13
1.3.3.3 Uso del aerogenerador de baja potencia.	14
1.4. ENERGÍA EÓLICA.	15
1.4.1.1 Vientos Globales:.....	15
1.4.1.2 Vientos Geostrofos:.....	15
1.4.1.3 Vientos de superficie y Locales:	15
1.4.2 <i>Velocidad del Viento.</i>	17
1.4.3 <i>Potencia y Energía del Viento.</i>	20
CAPÍTULO 2.....	27
2.1. PALAS.....	28
2.1.1 <i>INTRODUCCIÓN.</i>	28
2.1.1.1 Diseño Tripala.....	28
2.1.1.2 Diseño Bipala.....	29
2.1.1.3 Diseño Monopala.	29
2.1.2 <i>Especificaciones sobre los diseños bipala y tripala.</i>	30
2.1.3 <i>Conclusiones.</i>	30
2.2. CONCEPTOS Y TIPOS DE PALAS AERODINAMICAS.....	30
2.2.1 <i>Maquina de eje vertical.</i>	31
2.2.2 <i>Máquinas de eje horizontal.</i>	31
2.2.2.1 Hélice Multipala:	32
2.2.2.2 Hélice Tradicional:.....	32
2.2.2.3 Hélice de palas huecas:	33
2.2.2.4 Hélice Aerodinámica:	33
2.3. PARTES DE UN PERFIL.	37
2.3.1. <i>Introducción.</i>	37
2.3.1.1 Nomenclatura de los perfiles NACA.....	39
2.4. MATERIAL DE LAS PALAS.....	41
2.5. CONSTRUCCION DE LAS PALAS.....	43
2.5.1. <i>INTRODUCCIÓN.</i>	43
2.5.1.1 Materiales.....	43
2.5.1.2 El extremo raíz.	43
2.5.1.3 Perfil Aerodinámico.	44
2.5.1.4 Acabado de la superficie de la palas.	47
2.5.2 <i>PREPARACIÓN DE LOS EXTREMOS RAÍZ DE LAS PALAS.</i>	48
2.5.3 <i>CURVA CARACTERÍSTICA DE LAS PALAS.</i>	49
2.6. CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR.	50
2.7. LA VELETA.....	51
2.7.1. <i>CONCEPTOS.</i>	51
2.7.2. <i>TIMON DE LA EOLICA.</i>	55
2.7.2. <i>ESTRUCTURA DE LA VELETA.</i>	57

2.8. SISTEMA DE REGULACIÓN DE POTENCIA.	58
2.8.1. Cambio del ángulo de paso ("pitch controlled").	60
2.8.2. Regulación por pérdida aerodinámica ("stall controlled") de forma pasiva.	60
2.8.3. Regulación por pérdida aerodinámica de forma activa.	61
2.9. POSIBLES METODOS DE REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD EN ESTE PROYECTO.	62
2.9.1. Variación del área de captación.	62
2.9.2. Cortocircuito del generador.	63
2.9.3. METÓDO ADOPTADO. PALETA DESORIENTADORA.	64
2.9.3.1 FUERZAS EN LA PALETA.	65
2.9.4. DISTANCIAS ENTRE PALETA Y EJE DE ROTACION (M).	68
2.9.5. DESORIENTACIÓN MANUAL.	69
2.9.5.1 MUELLES.	74
2.11. TORRES.	75
2.11.1. Torres tubulares de acero.	75
2.11.2. Torres de celosía.	75
2.11.3. Torres de mástil tensado con vientos.	76
2.11.4. CONSIDERACIONES REFERENTES A LAS TORRES.	76
2.11.5. Consideraciones de coste.	77
2.11.6. Consideraciones aerodinámicas.	77
2.11.7. CONSIDERACIONES DE DINÁMICA ESTRUCTURAL.	77
2.11.8. Elección entre torres altas y bajas.	77
2.12. CONSIDERACIONES EN LA SEGURIDAD EN EL TRABAJO.	78
2.13. CARGAS DE FATIGA.	79
2.14. EJEMPLO DE DINÁMICA ESTRUCTURAL.	80
2.15. TORRE REFERENTE A ESTE PROYECTO.	80
2.15.1. Introducción.	80
2.15.1.1 Atirantadas.	81
2.15.1.2 Autoportantes.	81
2.15.1.3 Postes Telegráficos.	82
2.15.2. Elevación del poste.	85
2.16. EMPLAZAMIENTO DE LA TORRE.	86
2.16.1. Otras ubicaciones.	87
2.17. OBTENCIÓN DE LA TORRE DEL PROYECTO.	87
2.17.1. ESTRUCTURA DE GENERADOR.	88
CAPÍTULO 3	89
3.1. CONCEPTOS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR.	90
3.1.1. Introducción.	90
3.1.2. Fuerzas magnéticas.	93
3.1.3. Perdidas en Maquinas Electricas.	95
3.1.4. Par Electromagentico.	97
3.2. FUNDAMENTOS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS:	99
3.2.1 DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO EN EL ENTREHIERRO:	100
3.2.2. MÁQUINAS MULTIPOLARES:	101
3.2.3. ATENUACIÓN DE ARMÓNICOS:	103
3.2.4. DEVANADO DISTRIBUIDO:	104
3.2.5. Número de pares de polos.	106
3.2.6. Importancia del número de polos en ESTE proyecto.	107
3.2.6.1. Aumento del número de pares de polos.	107
3.2.7. Multiplicadora:	108
3.3. IMANES.	110

3.3.1. PARTES DE UN IMÁN.....	110
3.3.2. Tipos de Imanes.....	111
3.3.2.1 Imanes naturales.....	111
3.3.2.2 Imanes de Ferrita.....	112
3.3.2.3 Imanes de alnico.....	112
3.3.2.4 Imanes de Tierras Raras.....	112
3.3.3. CLASIFICACIÓN MATERIALES MAGNÉTICOS:.....	112
3.3.3.1 DIAMAGNÉTICOS:.....	113
3.3.3.2 PARAMAGNÉTICOS:.....	113
3.3.3.3 FERROMAGNÉTICOS:.....	113
3.3.4. PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS:.....	114
3.3.5. PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE FOUCAULT:.....	114
3.3.6. ALGUNAS DEFINICIONES EN IMANES PERMANENTES.....	115
3.3.6.1 Temperatura Máxima de Trabajo.....	115
3.3.6.2 Temperatura de CURIE, Tc:.....	115
3.3.6.3 Consejos importantes para el trato con imanes de Neodimio.....	115
3.4. CURVAS DE MAGNETIZACIÓN DE IMANES.....	117
3.4.1. Histéresis.....	117
3.4.2. Curva de magnetización del segundo cuadrante.....	118
3.5. CIRCUITOS MAGNÉTICOS.....	118
3.5.1. ALGUNAS ECUACIONES RELACIONADAS A LAS MAGNITUDES MAGNETICAS.....	119
3.5.1.1 LEY DE AMPERE:.....	119
3.5.1.2 Definición de permeabilidad.....	119
3.5.1.3 Permeabilidad en el Sistema Internacional:.....	120
3.5.1.4 Idea de “línea de fuerza”.....	120
3.5.1.5 Flujo y densidad de flujo.....	121
3.5.1.6 LEY DE FARADAY:.....	121
3.5.1.7 LEY DE LENZ:.....	122
3.5.1.8 Consideraciones de las formulas magneticas.....	122
3.5.1.9 Concepto de Producto de Energía.....	123
3.5.1.10 Concepto de recta de carga.....	123
3.6. CALCULO IMANES.....	124
3.6.1. Fuerza Centrifuga de los imanes.....	134
3.7. CONVERSION DEL MOTOR A GENERADOR.....	138
3.7.1 Introducción.....	138
3.7.2. OBTENCION DEL MOTOR.....	140
3.7.3. CONSTRUCCION GENERADOR.....	144
3.7.3.1 IMPREGNACION POR MASILLA.....	145
3.7.3.2 SUJECCION MEDIANTE ABRAZADERAS.....	146
3.7.3.3 CILINDRO DE RADIO IGUAL AL ROTOR MÁS LOS IMANES.....	147
3.7.3.4 Impregnación mediante alguna fibra, como la de carbono o vidrio.....	148
3.7.3.5 Combinación de dos anillos unidos con varillas.....	149
3.7.3.6 Colocación de anillos para facilitar el montaje.....	150
3.7.3.7 COLOCACIÓN DE UNOS ANILLOS SIN CUÑAS ALREDEDOR.....	151
3.7.3.8 SOLUCIÓN ADOPTADA. COMBINACIÓN DE ANILLOS MÁS MASILLA.....	151
3.8. TORNEADO DEL ROTOR.....	152
3.8.1. Introducción.....	152
3.8.1.1 CON LA FORMA DE LOS IMANES.....	152
3.8.1.2 DISEÑO DE IMANES CURVOS CON SISTEMA DE ENGANCHE AL ROTOR.....	153
3.8.1.3 AGUJEROS AXIALES.....	153
3.8.1.4 SOLUCIÓN ADOPTADA. CANALES LONGITUDINALES.....	154
3.9. PROCESO DE CREACIÓN.....	156
3.9.1. Introducción.....	156
3.9.2. Torneado y Fresado.....	156
3.9.3. ADHESIÓN DE LOS IMANES.....	157
3.10. CÁLCULOS TEÓRICOS EN VACÍO.....	167

3.10.1. DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO EN EL ENTREHIERRO:	168
3.10.2. CÁLCULOS:	168
3.10.3. CÁLCULO DEL PUNTO DE OPERACIÓN:	170
3.10.4. DISTRIBUCIÓN CAMPO MAGNÉTICO:	172
3.10.5. FLUJO MAGNÉTICO:	173
3.10.6 TENSIÓN INDUCIDA:	174
3.11. CÁLCULOS TEÓRICOS EN CARGA.	178
3.11.1. INTRODUCCIÓN:	178
3.11.2. CÁLCULO TEÓRICO DEL PAR:	179
3.11.3. PAR COMO MOTOR:	181
3.11.4. PAR COMO GENERADOR:	182
3.12. ANÁLISIS DE JMAG EN VACÍO:	182
3.12.1. INTRODUCCIÓN:	182
3.12.2. INSTRUCCIONES PREVIAS EN JMAG:	183
3.12.3. DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO EN EL ENTREHIERRO:	183
3.12.4. TENSIÓN INDUCIDA:	187
3.13. JMAG EN CARGA.....	188
3.13.1. PAR DEL MOTOR:	189
3.13.2. PRINCIPIO CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA:	190
3.13.3. PAR DEL GENERADOR:	191
3.13.4. PRINCIPIO CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA:	191
3.14. ENSAYOS PRÁCTICOS.	193
3.14.1. Ensayo de Vacío.	193
3.14.2. TENSION INDUCIDA.	195
3.14.2.1 A VELOCIDAD NOMINAL Y CONEXIÓN ESTRELLA	195
3.14.2.2 A 400 RPM Y CONEXIÓN ESTRELLA	196
3.14.2.3 A VELOCIDAD NOMINAL Y CONEXIÓN TRIANGULO	197
3.14.2.4 A 400 RPM Y CONEXIÓN TRIANGULO	198
3.14.2.5 EN ESTRELLA Y A 400 RPM.	199
3.14.2.6 EN TRIANGULO Y A 400 RPM.	200
3.14.3. CALCULOS DE PAR COMO GENERADOR CONECTADO EN ESTRELLA	200
3.14.4. CALCULOS DE PAR COMO GENERADOR CONECTADO EN TRIANGULO	201
3.14.5. ENSAYOS DEL GENERADOR	202
3.15. COMPARACION TEORIA, JMAG Y REALIDAD.	204
3.15.1. DENSIDAD DE FLUJO EN EL ENTREHIERRO	205
3.15.2. TENSIÓN.	207
CAPÍTULO 4	209
4.1. INTRODUCCIÓN.	210
4.2. POSIBILIDADES.	210
4.2.1. Transformadores.	211
4.2.2. Colocar tres circuitos monofásicos.	212
4.2.3. Puente Tiristores.	214
4.2.4. REDUCTOR DE TENSIÓN.	214
4.2.5. Baterías.	215
4.2.6. Fase al Aire.	215
4.2.7. TAMAÑO DE LAS PALAS	216
4.2.8. IMANES MENOS POTENTES.	219
4.2.9. Conexión en Triangulo.	219
4.2.9.1 TERCER ARMONICO EN TRIANGULO.	219
4.2.10. REDUCTORA.	222
4.3. ZONA DE TRABAJO.....	228
CAPÍTULO 5	231

5.1 BATERÍAS.	232
5.1.1. INTRODUCCIÓN.	232
5.1.2. Sustitución de las baterías.	235
5.1.3. Comprobación con polímetro.	235
5.1.4. Síntomas de una batería cargada.	236
5.1.5. Factores que influyen en la vida de las baterías:	237
5.1.5.1 Sobrecarga.	237
5.1.5.2 Carga Insuficiente.	237
5.1.5.3 Falta de Agua.	238
5.1.6. Baterías de bajo mantenimiento.	238
5.1.7. Carga baterías.	239
5.1.7.1 Precauciones a tener en cuenta en la carga de baterías.	239
5.1.7.2. SISTEMAS DE CARGA.	240
5.1.8. Mantenimiento de baterías en servicio.	240
5.1.9. Indicadores de anomalías en baterías.	241
5.1.10. Asociación Baterías.	241
5.1.11. BATERÍAS UTILIZADAS.	242
5.2. RECTIFICADOR TRIFASICO.	244
5.3. BAJADA DE CORRIENTE.	248
5.3.1. Proceso, tipos y partes de la bajada de corriente.	250
5.3.1.1. Bajada de escobilla.	250
5.3.1.2 Sistema casquillo.	254
5.3.1.3 Sistema de chapa.	254
5.4. NECESIDADES DE LA INSTALACIÓN.	255
5.4.1. Iluminación.	255
5.4.2. Aparatos.	256
5.4.3. Nevera.	256
5.4.4. Televisor.	257
5.4.5. Instalación.	257
5.5. AUTONOMÍA DE LA INSTALACIÓN.	260
5.6. REGULADORES.	261
5.6.1. REGULADORES ELECTRONICOS DE LA CARGA.	261
5.6.2. REGULADOR ELECTRONICO DE VOLTAJE.	261
5.6.3. DESCONECTADOR DE FIN DE DESCARGA.	263
5.6.4. CIRCUITO DE FIN DE CARGA.	264
5.7. CUADRO DE CONTROL.	265
5.8. CONVERTIDORES CC/CA.	270
5.8.1. Introducción.	270
5.8.2. TIPOS DE ONDULADORES O INVERSORES.	271
5.8.2.1 Inversor monofásico de media onda.	271
5.8.2.2 Inversor monofásico de puente completo.	271
5.8.2.3 El inversor con modulación por onda cuadrada.	273
5.8.2.4 Inversor con modulación por onda cuasi-cuadrada.	274
5.8.2.5 Control por modulación de anchura de pulsos PWM.	274
5.8.2.6 Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI).	277
5.8.2.7 Inversores para este proyecto.	278
CAPÍTULO 6.	279
6.1 CONCLUSIONES.	280
6.2. MONTAJE DEL AEROGENERADOR.	281
6.3. LINEAS FUTURAS.	282
CAPÍTULO 7.	285
7.1. PRESUPUESTO.	286

7.1.1. INTRODUCCIÓN.....	286
7.1.1.1 Cuadro del presupuesto del proyecto.....	286
7.2. CURVAS DE POTENCIA.....	287
7.2.1. INTRODUCCIÓN.....	287
7.2.1.1 Curva de potencia para 12 voltios.....	287
7.2.1.2 Curva de potencia para 24 voltios.....	288
7.3. HERRAMIENTAS.....	289
7.3.1. Sargentos.....	289
7.3.2. Calibre o pie de rey.....	290
7.3.3. Torno.....	291
7.3.4. Fresadora.....	291
7.4. LINEAS FUTURAS. POSIBLES MEJORAS.....	292
7.4. PROBLEMAS CAUSAS Y SOLUCIONES EN LOS AEROGENERADORES.....	294
7.5. BIBLIOGRAFIA.....	296
7.5.1 Software informático utilizado:.....	297
7.5.2. Direcciones Web:.....	297
7.6. PLANOS.....	298

CAPÍTULO

1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN.

1.2. OBJETO.

1.3. ANTECEDENTES.

1.3.1 Dificultades de acceso a la energía

1.3.1.1 Precio de la electricidad

1.3.1.2 Alternativas energéticas.

1.3.2 El papel de la Energía en el desarrollo

1.3.3 La alternativa de la eólica de baja potencia

1.3.3.1 Aerogeneradores pequeños para el desarrollo rural.

1.3.3.2 Construcción de un aerogenerador de imanes permanentes.

1.3.3.3 Uso del aerogenerador de baja potencia.

1.4. ENERGÍA EÓLICA.

1.4.1.1 Vientos Globales:

1.4.1.2 Vientos Geostrofos:

1.4.1.3 Vientos de superficie y Locales:

1.4.2 Velocidad del Viento

1.4.3 Potencia y Energía del Viento

1.1 INTRODUCCIÓN.

El origen del presente proyecto radica en la falta de energía eléctrica en zonas rurales cercanas a núcleos de población, en las cuales puede haber huertas y casas de diferentes usos por parte de la población, pero que aún estando cerca de poblaciones de mayor tamaño se encuentran aisladas de la red eléctrica, y en las cuales el costo de una conexión a red es inasumible en comparación con los gastos de energía que acarrearán. Gracias a alternativas energéticas como los aerogeneradores se puede abastecer de la energía necesaria para usos mínimos como luz, radio y televisión, a muchas casas y terrenos en estas zonas cercanas a poblaciones de mayor tamaño.

En estas zonas, muchas casas utilizan baterías eléctricas para tener potencia eléctrica, y a menudo se cargan en la ciudad más cercana, lo que puede ser costoso en dinero, tiempo y conveniencia. Los pequeños aerogeneradores son una opción mejor para cargar las baterías. El proyecto se desarrolla como proyecto de fin de carrera para el autoabastecimiento de una de estas huertas o terrenos en la zona de tierra Estella de Navarra.

El alcance del proyecto incorpora un manual de manufactura del aerogenerador, información de los materiales, proveedores y precios de los componentes que permita una construcción fácil, económica y correcta del aerogenerador. El estudio eléctrico del aerogenerador permite obtener, de forma aproximada, las relaciones entre todos los parámetros que influyen en el cálculo del valor de la potencia eléctrica de salida en función de la velocidad de entrada del viento, y poder así evaluar rápidamente la sensibilidad del sistema ante la variación de determinadas variables.

1.2. OBJETO.

Este proyecto tiene como objeto la construcción de un pequeño aerogenerador para el suministro eléctrico de una pequeña vivienda aislada de la red eléctrica, para satisfacer pequeñas demandas de energía.

Para llevar a cabo este proyecto se parte de que la previsión de cargas en la vivienda es muy baja y se requerirá de muy poca potencia de suministro así que se supone que el aerogenerador suplirá sin problemas los gastos energéticos. En capítulo 5 se puede observar entre otras cosas:

- la previsión de cargas de la instalación.
- Autonomía del almacén energético.
- Curvas de batería.

Para ello se intentarían reutilizar en la medida de lo posible elementos en desuso y de este modo reducir el presupuesto al mínimo posible.

1.3. ANTECEDENTES.

1.3.1 DIFICULTADES DE ACCESO A LA ENERGÍA.

En muchos lugares del planeta el acceso a la energía eléctrica aún no es posible, y tanto el crecimiento de la población mundial como el aumento del consumo energético hacen que en un largo plazo sea imposible garantizar el acceso a la energía eléctrica para toda la población mundial.

Todo país en desarrollo requiere de una gran cantidad de energía para la construcción de la industria y del nivel de desarrollo adecuado. Al no poder disponer de esta energía necesaria para el desarrollo del país tampoco pueden crear la infraestructura necesaria para abastecerse de más energía, lo cual dificulta el crecimiento del país.

Más de 1.600 millones de personas en el año 2.000, no tenían acceso a la electricidad, o lo que significa un 27% de la población mundial; aproximadamente 509 millones en el África sub-sahariana, 800 millones en la India, 223 en el sur de Asia y 56 millones en Sudamérica, lo cual da una muestra de la pobreza intrínseca a la falta de energía y viceversa.

Cuatro de cada cinco personas sin acceso a electricidad viven en áreas rurales. En África, más del 83% de la población en zonas rurales aun carece de electricidad. En el sur de Asia, el 70% de la población rural no tiene acceso a la electricidad.

1.3.1.1 Precio de la electricidad.

No obstante, la falta de infraestructura no es el único hándicap para el acceso a la energía. Incluso cuando existe la infraestructura para suministrar electricidad. Existe quien se ven incapaces de pagarla. Principalmente hay dos barreras:

- El coste inicial de conexión a la red y del cableado interior, que puede ser muy elevado para casas alejadas o sin ingresos suficientes.
- El pago mensual del consumo realizado.

1.3.1.2 Alternativas energéticas.

Es esta una de las razones por las que surge la interesante idea de invertir en los recursos de cada zona. Como combustibles fósiles, para hacer funcionar actividades de generación. O la posibilidad de creación de huertas solares en lugares donde este es un recurso abundante, así como la posibilidad como es el caso de este proyecto de la creación de pequeños aerogeneradores capaces de cubrir pequeñas necesidades energéticas en áreas alejadas o sin acceso a la red.

1.3.2 EL PAPEL DE LA ENERGÍA EN EL DESARROLLO.

Como se ha descrito anteriormente, la energía lleva implícito el nivel de desarrollo de un país. Además, el consumo de energía también va ligado a este desarrollo económico y social. El acceso a la energía permite mejorar las condiciones de vida, incluyendo mejoras en la salud, la alimentación y la educación.

El acceso a formas modernas de energía evita el consumo poco eficiente de biomasa tradicional, leña y excrementos animales con la consecuente reducción de enfermedades respiratorias.

En la mayor parte de los países empobrecidos, se dedican una parte muy importante del tiempo al acopio de combustible. El acceso a combustibles modernos permite ganar tiempo que pueden dedicar a mejorar la productividad de huertos, a la educación, o a otras áreas.

La electricidad permite alargar las horas de luz, lo cual mejora la productividad en talleres y fabricas además de permitir su uso para otras actividades de la sociedad moderna.

La energía eléctrica es una forma evolucionada de energía final, debe producirse a partir de energía primaria y como se a descrito anteriormente esta muy relacionada al nivel de desarrollo de un país. Actualmente es indispensable en el nivel de confort occidental, y la sociedad de la información y del conocimiento en la que vivimos sería imposible sin ella.

Así pues, en zonas rurales donde no existe infraestructura de distribución ni de consumo, la utilización de energías renovables no solo representa una opción viable sino que a menudo puede resultar la única opción de proporcionar acceso a la electricidad a estas zonas aisladas de la red.

1.3.3 LA ALTERNATIVA DE LA EÓLICA DE BAJA POTENCIA.

Como se ha comentado anteriormente, más de 2.000 millones de personas, la mayoría en zonas rurales alejadas se encuentran sin abastecimiento de energía eléctrica. El alto coste de estos patrones de producción y consumo de energía, limita en gran medida las oportunidades de desarrollo social y económico de estas comunidades, a la vez que contribuyen a la degradación.

En un aspecto más cercano, permite el acceso a la energía eléctrica a lugares sin acceso a red, o cuyo acceso sería un alto coste económico, y también medioambiental para las características de su uso como puede ser, dar acceso a la energía a segundas viviendas, huertas, o pequeñas casas donde la necesidad de electricidad no es abundante ni sus características son de grandes consumos, pero si necesaria para el uso habitual de la vida en estos lugares como puede ser el uso de neveras, televisores o bombas de extracción de agua, ya sea de forma continuada o como puede ser el caso de huertas y segundas residencias de forma esporádica.

La energía eólica comparada con otros tipos de alternativas energéticas renovables resulta competitiva frente a la fotovoltaica, la biomasa y la de generadores diesel, sólo resulta más cara que la micro-hidráulica.

1.3.3.1 Aerogeneradores pequeños para el desarrollo rural.

El aerogenerador convierte la energía del viento en energía eléctrica, que puede ser usada para la carga de baterías, electrificación de casas y granjas, reducción del consumo de generadores diesel, accionamiento de bombas para la extracción de agua, etc. Dada la naturaleza intermitente del viento, es usual incorporar al sistema algún tipo de dispositivo de almacenamiento, se vienen utilizando baterías convencionales de plomo-ácido con una capacidad de 1kWh.

1.3.3.2 Construcción de un aerogenerador de imanes permanentes.

En el presente proyecto se ha pensado en la posibilidad de adaptar un motor de jaula de ardilla en desuso para la construcción de un aerogenerador simple de imanes permanentes.

Esta propuesta de construcción del aerogenerador de imanes permanentes, nos lleva a la interesante tarea de desarrollar un proyecto que tiene como objetivos fundamentales, la construcción de un manual para la construcción de dicho aerogenerador que permita facilitar las gestiones necesarias para obtención de materiales, montaje, puesta a punto del aerogenerador, así como adecuarlo a un presupuesto corto pero lo más óptimo

posible, y suministrar de energía eléctrica a una pequeña vivienda en una zona rural.

1.3.3.3 Uso del aerogenerador de baja potencia.

En zonas sin red eléctrica, muchas casas utilizan baterías eléctricas de motocicletas, coches o camiones para tener potencia para radios o televisión, además, en países como Noruega con grandes periodos sin luz y muchas zonas rurales el hecho de disponer o no de luz influye de manera significativa en la vida de sus habitantes.

Es en la carga de estas baterías donde entra el juego la utilización de aerogeneradores de baja potencia, con sus puntos a favor y contra a tener en cuenta.

Ventajas

- La cantidad de energía disponible de las baterías puede aumentar, y no se tendrán que comprar nuevas baterías frecuentemente: En una buena localización, y cuidando el uso de la energía y la batería, la cantidad de energía disponible para usarse será mayor cuando la batería se cargue gradualmente que cuando se cargue periódicamente. Además, las baterías actualmente se estropean por descargas muy fuertes, y esto las deja inservibles más rápido que si fueran cargadas por un aerogenerador.
- Las baterías se pueden cargar cerca de la casa, ahorrando tiempo y dinero al no tener que desplazarse para su cambio o recarga.
- La energía eólica respeta el medio ambiente: Aunque se utiliza energía en la construcción de un aerogenerador, una vez están funcionando, no consume combustibles fósiles y por tanto no emite gases de efecto invernadero. El ruido producido a las bajas velocidades de giro es muy pequeño y muchísimo menor que el producido por generadores diesel.
- La energía eólica es más barata que sus alternativas: Donde el recurso eólico es bueno, la energía producida mediante aerogeneradores es más barata que utilizando generadores diesel o fotovoltaicos, particularmente si el suministro de combustible está lejos del usuario. Si el sitio está localizado cerca de un río o riachuelo, la potencia hidráulica debería estudiarse primero, ya que esta puede ser más competitiva. La electricidad (de red), si está disponible, será lo más barato de todo. En áreas remotas, sin embargo, el coste de la conexión a la red es tan elevado, que excede mucho de los sistemas que utilizan baterías (solares o eólicas).

- Puede ser una opción aún más atractiva: La potencia de la batería puede ser un paso intermedio antes de la conexión a la red, ya que mediante el uso de inversores se consigue corriente alterna que va a parar a los diferentes conexiones y aparatos de la casa que en un futuro sin ser modificados sirven para la conexión a la red.

Desventajas

- La importancia del régimen de viento: El factor más importante en el éxito o fracaso de cualquier instalación eólica es la fuerza y naturaleza del viento.
- Coste inicial: Para poner el generador en la trayectoria del viento, el aerogenerador necesita ser colocado en el extremo de una torre, Además será necesario alojar las baterías y el circuito de control en un edificio que no este a la intemperie.

1.4. ENERGÍA EÓLICA.

La energía eólica proviene de la energía que el Sol aporta a la tierra. Alrededor del 1 al 2 por ciento de esa energía es convertida en energía eólica. La Tierra funciona como una gran máquina térmica que transforma parte del calor solar en la energía cinética del viento. Esa energía provoca corrientes de aire debido a que los aires calidos son más ligeros que los aires fríos.

Estas corrientes provocan diferentes vientos:

1.4.1.1 Vientos Globales:

Cuando los vientos calentados por la radiación del Sol se desplazan desde el ecuador hacia el Norte y hacia el Sur.

1.4.1.2 Vientos Geostróficos:

Los vientos geostroficos son en realidad vientos globales generados, principalmente, por las diferencias de temperatura, así como por las de presión, y apenas son influenciados por la superficie de la tierra. Los vientos geostroficos se encuentran a una altura de 1.000 metros a partir del nivel del suelo.

1.4.1.3 Vientos de superficie y Locales:

Los vientos están mucho más influenciados por la superficie terrestre a altitudes de hasta 100 metros. El viento es frenado por la rugosidad de la superficie de la tierra y por los obstáculos, ya que las velocidades del viento se ven afectadas por la fricción con la superficie terrestre. En general, cuanto más pronunciada sea la rugosidad del terreno mayor será la ralentización que experimente el viento.

Tratándose de energía eólica interesará conocer los vientos de superficie y cómo calcular la energía aprovechable del viento.

Tabla de clases y de longitudes de rugosidad			
Clase de Rugosidades	Longitud de rugosidad (m)	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje
0	0,0002	100	Superficie del agua
0,5	0,0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p.ej., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0,03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas
1,5	0,055	45	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1250 m.
2	0,1	39	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2,5	0,2	31	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0,4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual

3,5	0,8	18	Ciudades más grandes con edificios altos
4	1,6	13	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos
Definiciones de acuerdo con el Atlas Eólico Europeo, WAsP.			

En lo referente a este proyecto, el molino se ubicará en la vega del río Ega a su paso por la localidad Navarra de Lerín. Esta ubicación, en la zona de la Navarra media, a pesar de no existir montañas de gran relieve, si que tiene un terreno accidentado con colinas y sierras, pero esta rugosidad del terreno, al no ser muy pronunciada, no provocará una ralentización del viento considerable. En la parcela de utilización no existen obstáculos reseñables en un radio de 500 metros en la dirección de los vientos predominantes provenientes del Noroeste y del Sureste, lo que unido a la cercanía del río Ega, hace de este emplazamiento una ubicación adecuada para la colocación del molino.

1.4.2 VELOCIDAD DEL VIENTO.

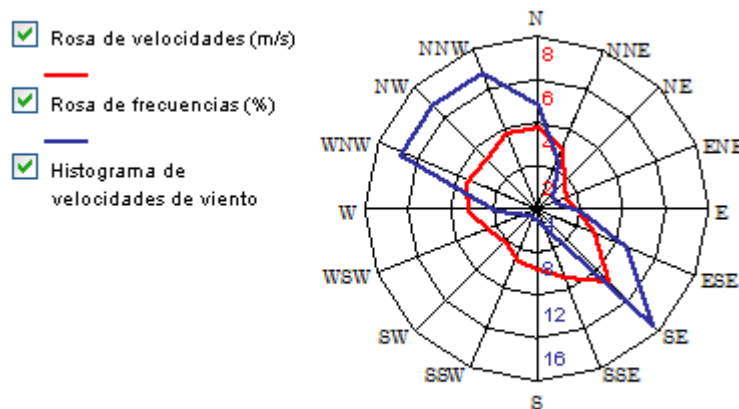
La velocidad del viento es muy importante para la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad.

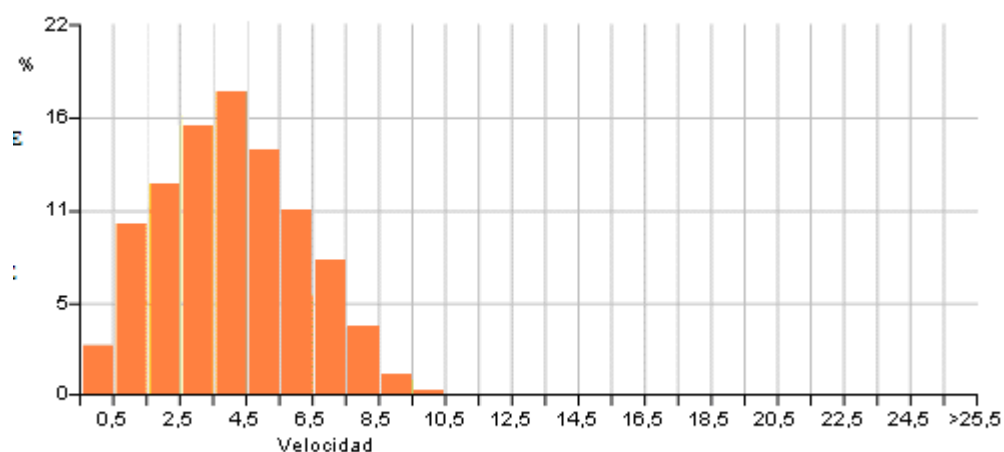
El viento no viaja a una velocidad constante, además de la variabilidad y de las ráfagas, existen variaciones entre el día, con más velocidad, y la noche, con menos velocidad que durante el día, y entre verano e invierno, por lo que la productividad de la turbina eólica dependerá de estas fluctuaciones, no obstante, la agencia estatal de meteorología ha establecido mediante mediciones una velocidad media a lo largo de un año en el municipio de Lerín de 3,52 m/s.

Escala de velocidades de viento			
Velocidades de viento a 10 m de altura		Escala Beaufort (anticuada)	Viento
m/s	nudos		
0,0-0,4	0,0-0,9	0,00	Calma
0,4-1,8	0,9-3,5	1,00	Ligero
1,8-3,6	3,5-7,0	2,00	
3,6-5,8	7-11	3,00	
5,8-8,5	11-17	4,00	Moderado
8,5-11	17-22	5,00	Fresco
11-14	22-28	6,00	Fuerte
14-17	28-34	7,00	

17-21	34-41	8,00	Temporal
21-25	41-48	9,00	
25-29	48-56	10,00	Fuerte temporal
29-34	56-65	11,00	
>34	>65	12,00	Huracán

En una máquina eólica, se pueden considerar tres velocidades del viento características de la misma. La velocidad de conexión, v_{conex} , es aquella velocidad del viento por encima de la cual se genera energía. Por debajo de esta velocidad toda la energía extraída del viento se gastaría en pérdidas y no habría generación de energía, el valor de esta velocidad de conexión es de unos 2 m/s. La velocidad nominal, v_{nom} , es aquella velocidad del viento para la que la máquina eólica alcanza su potencia nominal, normalmente esta velocidad es de 5-6 m/s. Por encima de esta velocidad, la potencia extraída del viento se puede mantener constante. La velocidad de desconexión, v_{corte} , es aquella velocidad del viento por encima de la cual la máquina eólica deja de generar, porque se embala, los sistemas de seguridad comienzan a actuar frenando la máquina, según se regule puede ser de unos 15 m/s.





*Rosa de los vientos e Histograma para la localidad de Lerín de
www.cener.com*

1.4.3 POTENCIA Y ENERGÍA DEL VIENTO.

La energía que tiene el viento es energía cinética, esta energía es debida a la masa del aire en movimiento. Como podemos ver en la formula esta energía es directamente proporcional a la masa del viento, es decir, para el doble de masa tendremos el doble de energía claro que la masa del viento siempre va a ser constante así que la única variable en la formula de la energía cinética va a ser la velocidad del viento.

Esta variable, según la formula, esta elevada al cuadrado así que la energía obtenida del viento aumentará a razón de 2 veces la velocidad del viento tal y como se puede observar en la siguiente formula.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Donde:

m es la masa de aire (Kg).

v es la velocidad instantánea del viento (metros/segundo).

Esta claro que lo que aquí lo que interesa, es saber la potencia que podemos extraer del viento de forma mecánica para luego convertirla en eléctrica.

Sabiendo que:

$$m = \rho \cdot A \cdot V$$

Donde:

P= es la densidad del aire (1,25 Kg/m³).

A= es la superficie perpendicular a la corriente de aire, barrida por la máquina, (m²);

V= velocidad del viento a la entrada de la turbina (m/s)

Sustituyendo en la formula de la energía cinética podemos hallar la potencia:

$$P_{viento} = \frac{E_{cinetica}}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

$$P = 0.62 \cdot A \cdot v^3$$

Con esta formula podemos observar que la potencia obtenida del viento

es directamente proporcional al área barrida por las palas ($A = \frac{\pi D^2}{4}$) y al cubo de la velocidad.

Sin embargo, no se puede conseguir toda esta potencia, ya que la velocidad, una vez atravesada la superficie captadora, no es nula (ni puede serlo). Betz, demostró que el valor máximo teórico que puede obtenerse, es del 59,3% de toda la energía del viento.

Esto quiere decir que la máxima potencia teóricamente aprovechable será:

$$P = 0.625 \cdot 0.593 \cdot A \cdot v^3$$

$$P = 0.37 \cdot A \cdot v^3$$

Esta es la potencia que obtendríamos con un aerogenerador de rendimiento 100% respecto al máximo teórico de Betz , es decir que a esta formula todavía hay que descontarle las perdidas del aerogenerador ya que esta formula valdría únicamente para uno ideal.

El factor por el que vamos a multiplicar la ecuación anterior de la potencia es llamado coeficiente de rendimiento así podremos sacar la potencia real que podremos sacar del viento.

La tabla con los diferentes coeficientes dependiendo del tipo de pala:

TIPO DE CAPTOR	COEFICIENTE DE RENDIMIENTO	RAZON VELOCIDAD PUNTA PALA	OBSERVACIONES
MOLINO CRETENSE	0,3	1	Es lento con mucho par y buen rendimiento no automatizable
HELICE MULTIPALA	0,3	1	Es lento con mucho par resistente y buen rendimiento
MOLINO TRADICIONAL	0,3	2	Velocidad y par medio con buen rendimiento pero con poco par de arranque
HELICE AERODINAMICA	0,45	7	Mucha velocidad y rendimiento pero con muy poco par en el arranque
HELICE PALAS HUECAS	0,3	3	Adecuado para espaldas al viento
VELAS DE TELA	0,3	3,5	Facil de hacer para grandes hélices

Teniendo en cuenta que nuestro tipo de pala va a ser del tipo hélice aerodinámica, el coeficiente de rendimiento que le corresponde es $C=0.45$.

Sustituyendo en la formula de la potencia anterior tenemos que:

$$P = 0.62 \cdot A \cdot v^3 \cdot C$$

En nuestro caso $C=0.45$ entonces:

$$P = 0.279 \cdot A \cdot v^3$$

Teniendo la anterior formula deducida podemos hacer un cuadro aclaratorio con las diferentes potencias que se pueden extraer del viento en función de diferentes velocidades y diferentes diámetros de rotores. Teniendo en cuenta que tenemos un molino de palas aerodinámicas con un coeficiente de rendimiento del 0.45:

Entonces podemos llegar a la conclusión de que el coeficiente depende del tipo de molino que elijamos y de nuestra habilidad como constructores.

Otra característica importante de las hélices es la razón de velocidad punta u/v . Este número relaciona la velocidad de la punta o extremo de la hélice con la del viento.

Por ejemplo, si la punta de una pala va a 60 m/s y la del viento en ese momento es de 10 m/s $u/v = 60/10 = 6$

Cuanto mayor es este factor, más rápida va la hélice, y cuanto menor, más lenta. Este factor sirve para calcular la velocidad de rotación de una hélice en función de la velocidad del viento y su diámetro:

$$r.p.m = \frac{19 \cdot v \cdot \left(\frac{u}{v}\right)}{D}$$

Donde

V =velocidad del viento en (m/s)

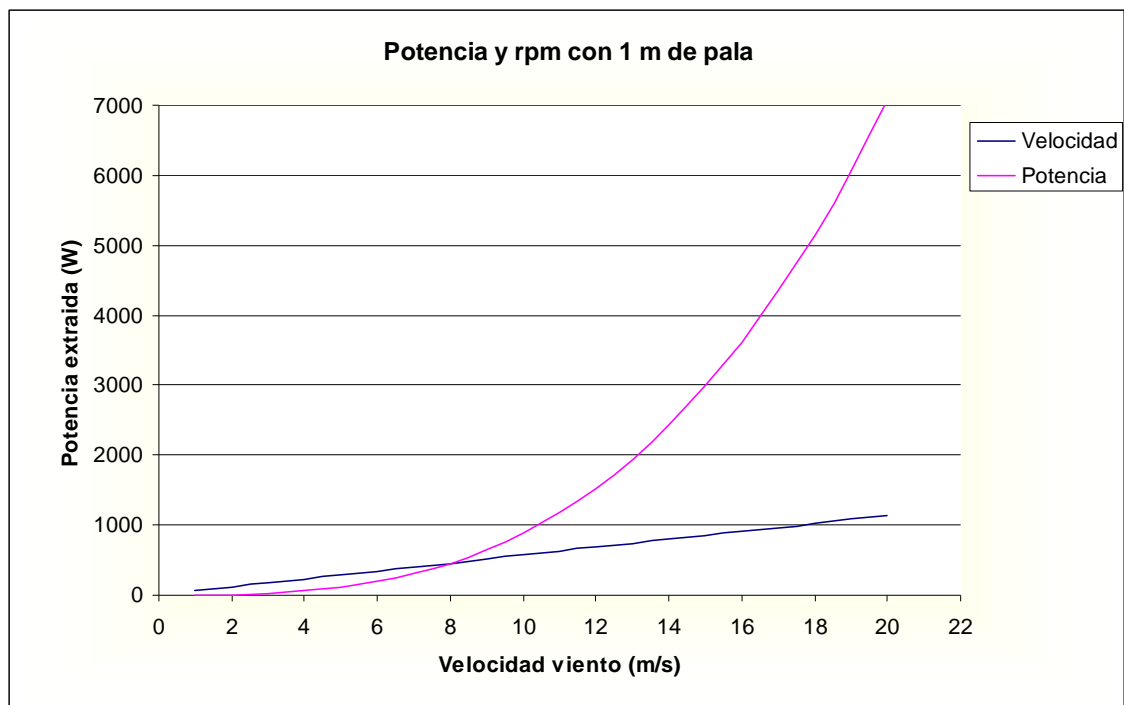
(u/v) = razón de velocidad (adimensional)

D =diámetro del rotor

Como hemos hecho anteriormente podemos hacer otro cuadro aclaratorio en el que podemos ver la revoluciones por minuto (r.p.m) que tienen que girar las palas, dependiendo del diámetro para generar dicha potencia:

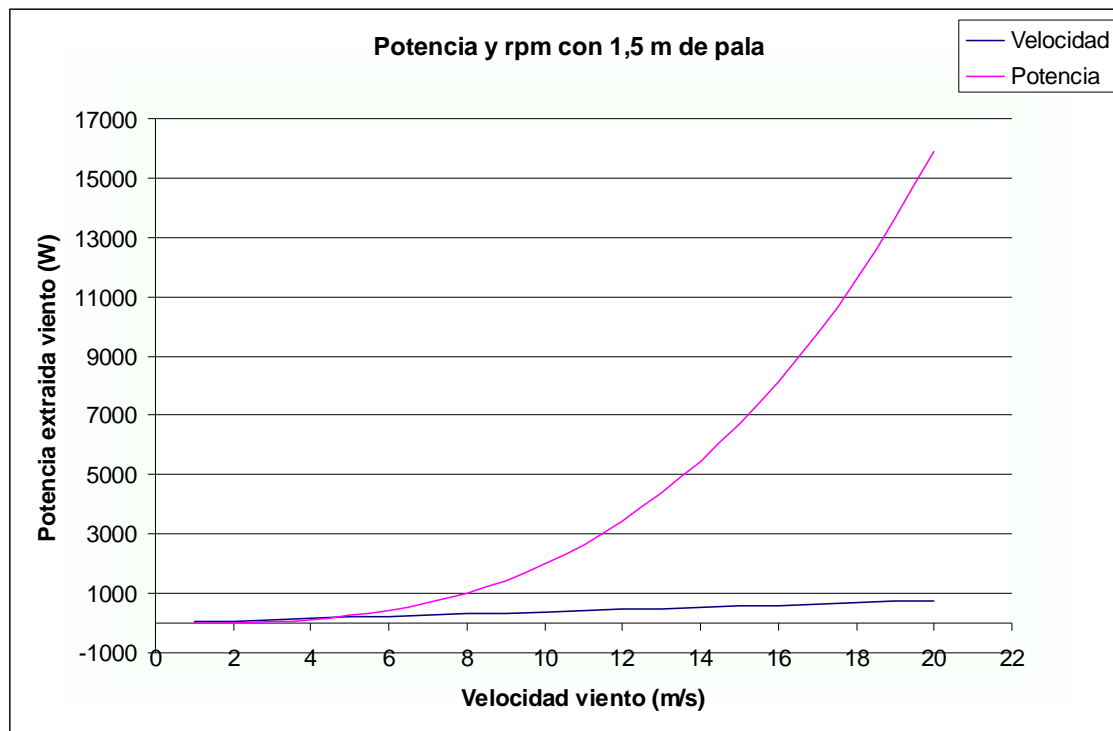
Para un diámetro de palas de 1 metro, $c_p = 0,45$, y $\lambda = 6$:

Velocidad del viento (m/s)	Velocidad de giro(rpm)	Potencia extraída del viento
1	57	0,88
2	114	7,07
3	171	23,86
4	228	56,55
5	285	110,45
6	342	190,85
7	399	303,07
8	456	452,39
9	513	644,13
10	570	883,58
11	627	1176,04
12	684	1526,82
13	741	1941,21
14	798	2424,53
15	855	2982,07
16	912	3619,12
17	969	4341,00
18	1026	5153,01
19	1083	6060,44
20	1140	7068,60



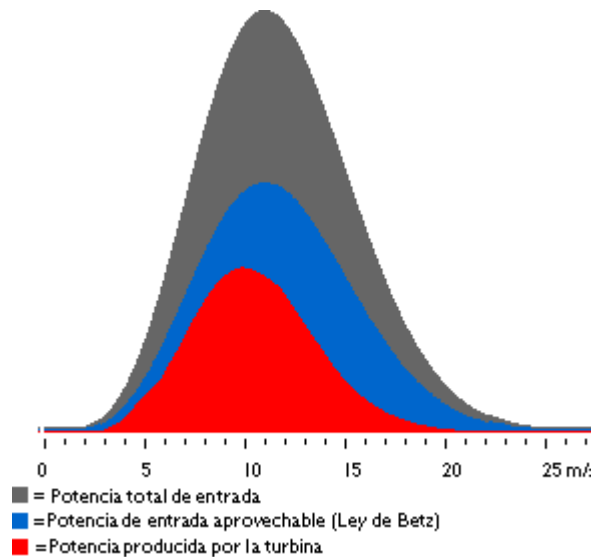
Para un diámetro de palas de 1.5 metros, $c_p = 0,45$, y $\lambda = 6$:

Velocidad del viento (m/s)	Velocidad de giro(rpm)	Potencia extraída del viento
1	38	1,99
2	76	15,90
3	114	53,68
4	152	127,23
5	190	248,51
6	228	429,42
7	266	681,90
8	304	1017,88
9	342	1449,28
10	380	1988,04
11	418	2646,09
12	456	3435,34
13	494	4367,73
14	532	5455,19
15	570	6709,65
16	608	8143,03
17	646	9767,26
18	684	11594,27
19	722	13635,99
20	760	15904,35



Una cosa que se puede deducir de lo anterior es que cuanto mayor es el par, mayor es la tendencia a arrancar y girar. Así se puede la multipala tiene un mayor par de arranque que la pala aerodinámica.

Por ejemplo para una velocidad nominal de 7m/s



En Navarra podemos diferenciar principalmente cuatro zonas en cuanto a potencial eólico a 40 metros de altura:

La Ribera del Ebro, con valores altos tanto de velocidad como de potencia de viento en todo su territorio (superiores a 90 W/m²), sobresaliendo los valores de zonas altas como Aguilar de Codés, Bardenas-El Yugo o Bardenas-Loma Negra. Las potencias más altas se dan hacia el sureste. En las rosas de viento destaca la fuerte presencia del Cierzo o viento del noroeste.

La Navarra Media, que es donde se situará el molino, con valores elevados (más de 600 W/m²) en las crestas de las sierras (Perdón, Alaiz, Ujué), y bastante más bajos en los valles más cerrados.

Las Cuencas Prepirenaicas, con valores en general más bajos, entre 50 y 120 W/m² según zonas.

El Nordeste y los Pirineos, en general ésta es la zona con menor recurso eólico de Navarra.

En una corriente de aire de densidad ρ , y velocidad v , la potencia eólica disponible que atraviesa una superficie A y hace un recorrido L en el tiempo t , viene dada por la expresión de la potencia del viento.

CAPÍTULO 2

Rotor Eólico y Torre

2.1. PALAS

2.2. CONCEPTOS Y TIPOS DE PALAS AERODINAMICAS

2.3. PARTES DE UN PERFIL.

2.4. MATERIAL DE LAS PALAS

2.5. CONSTRUCCION DE LAS PALAS

2.6. CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR

2.7. LA VELETA

2.8. SISTEMA DE REGULACIÓN DE POTENCIA

2.9. POSIBLES METODOS DE REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD EN ESTE PROYECTO

2.11. TORRES

2.12. CONSIDERACIONES EN LA SEGURIDAD EN EL TRABAJO.

2.13. CARGAS DE FATIGA

2.14. EJEMPLO DE DINÁMICA ESTRUCTURAL

2.15. TORRE REFERENTE A ESTE PROYECTO

2.16. EMPLAZAMIENTO DE LA TORRE

2.17. OBTENCIÓN DE LA TORRE DEL PROYECTO

2.1. PALAS.

2.1.1 INTRODUCCIÓN.

El concepto del número de palas a colocar en un aerogenerador es importante, ya que a partir de ese dato habrá variaciones en el comportamiento del aerogenerador. Variables a tener en cuenta como la potencia extraída del viento, velocidad y par ejercido de las propias palas, y sobretodo una de las cosas más importantes en algo que gira sobre su propio eje, las vibraciones.

Este concepto es importante ya que cuanta menos vibración haya en una máquina más tiempo medio de trabajo aguantará sin dar problemas de mantenimiento.

Los diseñadores de los aerogeneradores evitan construir máquinas con un número par de palas. La razón más importante es la existencia de lo comentado anteriormente, las vibraciones.

Un rotor con un número impar de palas puede ser considerado como un disco a la hora de calcular las propiedades dinámicas de la máquina.

Un rotor con un número par de palas puede dar problemas de estabilidad en una máquina que tenga una estructura rígida.

La razón es que en el preciso instante en que la pala más alta se flexiona hacia atrás, debido a que obtiene la máxima potencia del viento, la pala más baja pasa por la sombra del viento (se le llama sombra del viento al momento en que una pala pasa justo por delante de la torre, produciéndose así turbulencias en esa pala y en consecuencia vibraciones).

2.1.1.1 Diseño Tripala.

En la actualidad, prácticamente la mayoría de aerogeneradores tienen diseños tripala, con el rotor a barlovento (el rotor situado por delante de la torre en el momento que sopla el viento), usando motores eléctricos en sus orientaciones cara al viento.

A este diseño se le suele llamar el clásico "concepto danés", y tiende a imponerse como estándar al resto de conceptos evaluados.



2.1.1.2 Diseño Bipala.

Estos diseños tienen más desventajas que ventajas. La principal y única ventaja es la de ahorrar el coste de una pala y, por su puesto, su peso.

Sin embargo, su uso cada vez más se está disminuyendo debido sobre todo a la imposición del diseño tripala sobre todos los demás diseños.

Una de las desventajas más importantes a parte de las vibraciones (por ser un diseño de un número par de palas) es que necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida que una tripala. Obviamente esto supone un problema sobre todo de impacto medioambiental.



2.1.1.3 Diseño Monopala.

Su uso es muy poco común sobre todo en la actualidad. Este diseño al igual que el bipala tiene la gran ventaja de que se ahorra la fabricación palas en este caso de dos.

Este diseño tiene incluso más desventajas que el bipala, puesto que para generar la misma energía que genera un tripala su velocidad de giro tiene que ser incluso superior a la bipala.

Debido a este problema en la velocidad de giro el impacto medioambiental se agrava mucho más que en la bipala, produciendo así más ruidos y más posibles impactos de aves sobre la pala.

Otro artificio que habría que introducir en este diseño es el de un contrapeso en el lado del buje opuesto a la pala que equilibre el rotor.



2.1.2 ESPECIFICACIONES SOBRE LOS DISEÑOS BIPALA Y TRIPALA.

Este tipo de máquinas necesitan un diseño más complejo. La incorporación de un rotor basculante, es decir, el rotor tiene que ser capaz de inclinarse, con el fin de evitar fuertes vibraciones en la turbina cada vez que una de las palas pasa por la torre.

Así pues el rotor está montado en el extremo de un eje perpendicular al eje principal, y que gira junto con el eje principal. Esta disposición puede necesitar de amortiguadores adicionales que eviten que las palas del rotor choquen contra la torre.



2.1.3 CONCLUSIONES.

En referencia a este proyecto se limitaremos a seguir el aerogenerador con diseño tripala. Se ha elegido esta opción obviamente porque es el único diseño que garantiza una mayor durabilidad en las piezas del mismo, por la gran estabilidad que ofrece.

2.2. CONCEPTOS Y TIPOS DE PALAS AERODINAMICAS.

Si nos fijamos un poco en las palas de los numerosos aerogeneradores que hay en cualquier sitio podremos ver que son muy parecidas a las alas de un avión salvo con la única diferencia de que las de los aerogeneradores giran alrededor de un eje del que existen dos tipos:

2.2.1 MAQUINA DE EJE VERTICAL.

El eje de giro del rotor es vertical. Funcionan por la diferente resistencia al viento de las superficies interiores y exteriores de las palas.

Son muy aptas para trabajos mecánicos que requieran lentitud y fuerza (moler, bombear, etc.).

Las ventajas de estos aerogeneradores frente a los de eje horizontal, son:

- a) No necesitan orientarse al viento puesto que actúan en cualquier dirección.
- b) Los elementos que requieren un cierto mantenimiento pueden ir situados a nivel del suelo
- c) No requieren mecanismos de cambio de revoluciones, por cuanto no suelen emplearse en aplicaciones que precisen una velocidad angular constante.

2.2.2 MÁQUINAS DE EJE HORIZONTAL.

Se llaman así a las que tienen el eje de giro de la hélice horizontal. Son aptos para trabajos mecánicos (moler, serrar, bombear...). También se incluyen en este grupo los múltiplas de bombeo típicos, igualmente lentos y con mucha fuerza, y los molinos de hélices aerodinámicas rápidas, utilizados generalmente para la producción de energía eléctrica.

Este es el tipo de máquina elegido por ser el más conveniente y el que mejor se adapta a las necesidades del proyecto.

Las ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal respecto de los de eje vertical son:

- a) Mayor rendimiento
- b) Mayor velocidad de giro (multiplicadores más sencillos) Menor superficie de pala S a igualdad de área barrida A
- d) Se pueden instalar a mayor altura, donde la velocidad del viento es más intensa

Las palas también van a estar condicionadas según el tipo de hélice de los que existen varios tipos dentro de la familia de máquinas de eje horizontal:

2.2.2.1 Hélice Multipala:

Este tipo de hélice está formado por una circunferencia de hierro que soporta de 8 a 36 paletas metálicas que recubren toda la circunferencia. Estas hélices no adquieren gran velocidad, tienen un alto par de arranque que le permite girar con brisas muy suaves. Se suelen utilizar en bombeo de agua y en generación de electricidad acoplada a una multiplicadora.



2.2.2.2 Hélice Tradicional:

Son hélices aptas para trabajos mecánicos, se suelen construir con un esqueleto de madera que soporte una lona que es la que efectuará la resistencia al viento. Este tipo de hélices necesitan una gran elaboración y un gran diámetro para poder competir con la energía producida por una hélice aerodinámica.



2.2.2.3 Hélice de palas huecas:

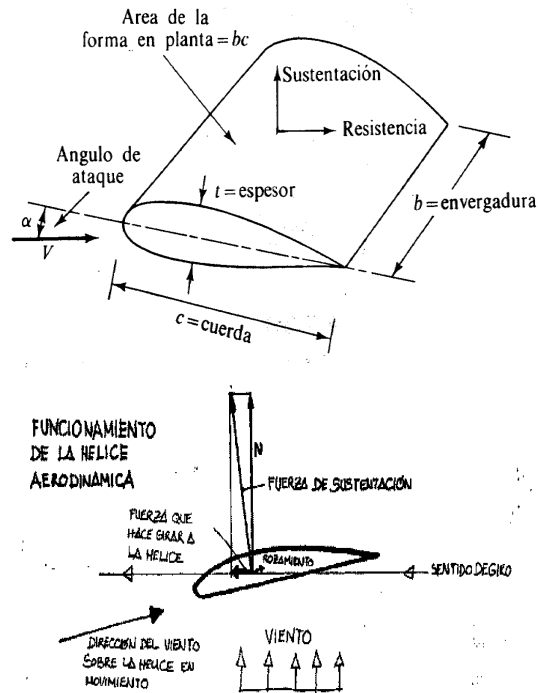
Poseen cierto parecido a las hélices aerodinámicas pero realizadas en chapa en lugar de en madera. La propia pala al centrifugar aire por el hueco interior al coger revoluciones, produce fuerzas de frenado que evita que adquieran altas velocidades.

2.2.2.4 Hélice Aerodinámica:

Es el tipo de pala más habitual, posee un buen rendimiento energético por lo que se obtiene la misma energía que con otro sistema pero para ello es necesario menor diámetro de rotor. Los perfiles más usados son NACA 4415 y CLARK-Y. Habrá de tener cuidado con que las tres palas estén en el mismo plano perpendicular al eje, y que el rotor sea simétrico.

Otra desventaja que podemos ver es el problema de la altas velocidades de giro de estas palas. Asimismo, la velocidad de las palas influye en las vibraciones que pueden provocar si no se equilibran correctamente y aunque parezca ser bueno que tengamos altas velocidades realmente resulta peligroso por rotura de las propias palas. Por ello habrá que idear un sistema de frenado, el cual ya explicaremos más adelante, que nos garantice la no rotura de las palas.

Otra desventaja de estas hélices es el poco par de arranque que tienen cuando están paradas. En el caso que queramos mucho par de arranque tendremos que tener palas de perfil ancho (ya que tienen más superficie en contacto con el aire), con el inconveniente de tener poca velocidad. Por el contrario si no necesitamos un elevado par de arranque con unas palas de perfil estrecho será suficiente, con la "ventaja" de tener altas velocidades.



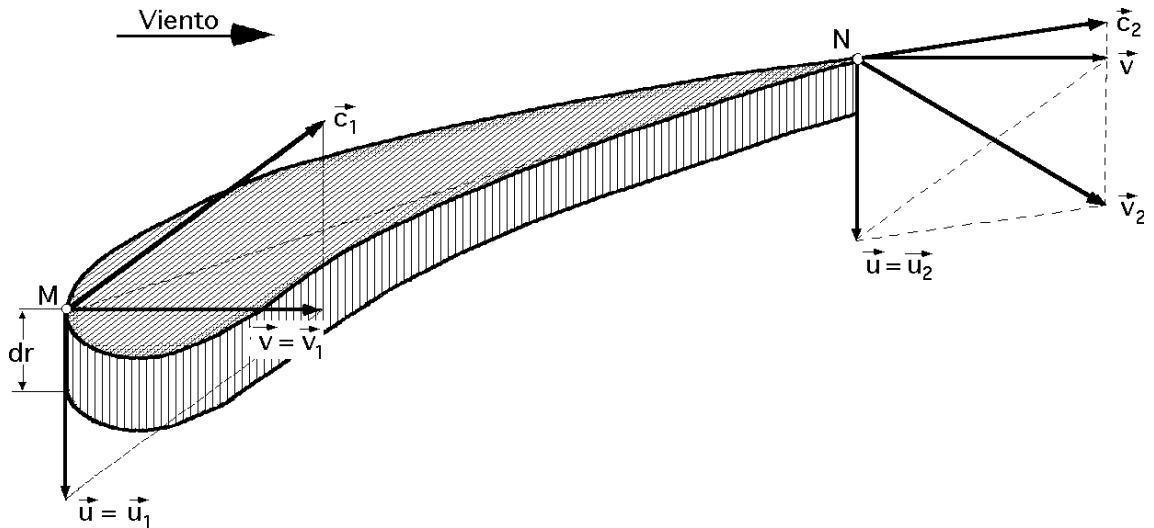
Podemos observar en el dibujo de la derecha que el viento viene de abajo arriba (eso en el dibujo, aunque en la realidad no es así). En cambio la pala cuando está girando a una velocidad, la que sea, no "ve" que el viento le esté dando en la dirección anteriormente citada sino que realmente está viendo que el viento le da con dos componentes: de abajo-arriba y sobre todo de izquierda - derecha.

Ésta última componente será mayor cuanto mayor sea la velocidad de giro y viceversa.

La otra componente también podrá ser derecha-izquierda si el sentido de giro es hacia el otro lado al dibujado.

Para aclarar un poco con los términos, a la velocidad que ve la pala se llama velocidad relativa, y a la velocidad que se ve desde fuera se le denomina velocidad absoluta.

Aquí adjuntamos otro dibujo aclarativo de velocidades absolutas y relativas.



Se empezaron a utilizar en aerogeneradores a principios del este siglo XX por tener una mayor velocidad de rotación, la cual es el cociente entre la velocidad en la punta de la pala (u) y la velocidad del viento (v) ($u/v = 5$ a 7) que permitía acoplar el generador con poca multiplicación o simplemente en directo.

La hélice aerodinámica tiene un buen rendimiento energético, por su alta velocidad.

($C_r = 0,45$, cociente de la energía que consigue aprovechar la pala y la cantidad de energía transportada por el viento) por lo que se obtiene la misma energía que la multipala con menos diámetro.

Funcionan por el mismo principio que permite volar a un pájaro: la sustentación, que en el siguiente párrafo explicamos.

Se utilizan preferentemente perfiles plano convexos por ser los más adecuados. Ya que el aire que impacta en la pala, lleva más velocidad en la parte convexa que en la cara plana.

En la cara convexa se ejerce una presión menor que en la cara plana, a este efecto se le denomina venturi. Gracias a esta diferencia de presiones en la pala se produce una fuerza llamada fuerza de sustentación S .

La fuerza S , puede descomponerse en una fuerza perpendicular al movimiento de la pala (N) y otra fuerza (F) que es la que hace que la pala gire.

También podemos distinguir otra fuerza que aparece siempre que hay algún tipo de movimiento, que es la fuerza de rozamiento entre la pala y el aire en este caso.

Para poder entender mejor todo este tipo de fuerzas que ejerce el aire sobre las palas, vamos a imaginarnos que estamos en la calle con una pala aerodinámica en la mano y nos ponemos cara al viento. Entonces sentimos que el viento nos llega a una velocidad de unos 10m/s. Con este dato podemos saber que la velocidad en la punta de la pala va a ser de unos 200Km/h dependiendo del radio de las palas.

También podemos saber que en ese punto se producirá una fuerza centrífuga bestial, será de unos 600 Kp, para un rotor de unos 2m de diámetro. Es por ello que en la punta de las palas de toda clase de aerogeneradores las cuales van a velocidades considerables hay poco material disminuyendo así esa fuerza.

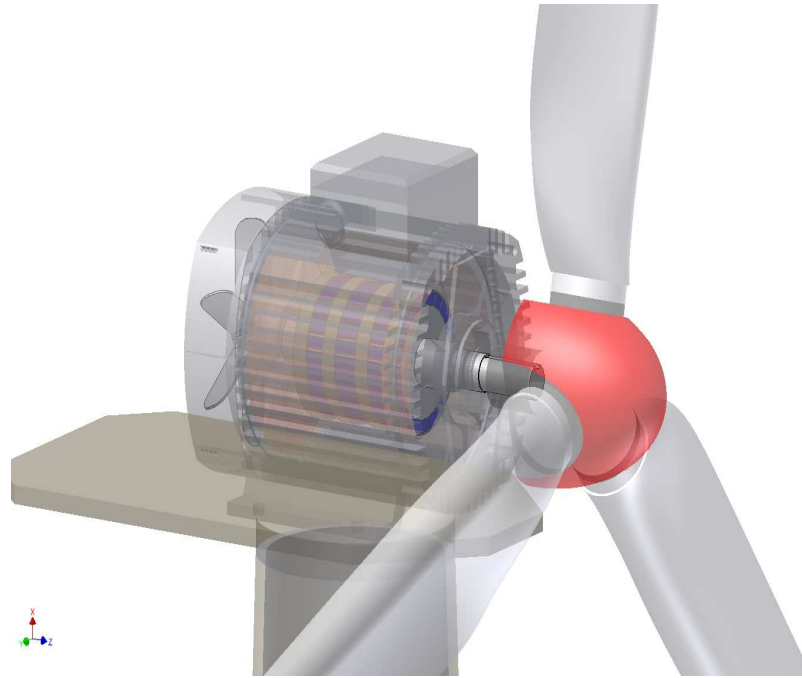
Si nos fijamos en la forma que tiene este tipo de palas podremos fijarnos que tienen una geometría bastante complicada.

Un ejemplo claro es la disminución del perfil de la pala conforme nos alejamos del centro, ésta disminución será inversamente proporcional al radio.

Para que podamos extraer la máxima energía de cada pala deberá ser necesario que el ángulo de ataque (inclinación de la pala en la cara plana de la misma) sea lo más parecido posible a la dirección real de la velocidad en ese punto. Ésta velocidad en "ese punto" es la resultante de componer la velocidad del viento (la cual es constante en todos los puntos de la pala, en este caso se considera 10 m/s) y la velocidad lineal de cada punto de la pala, la cual varía proporcionalmente con el radio.

Se puede llegar a la conclusión de que si la inclinación del perfil de la pala es constante unas partes de la pala trabajan "contra otras" desaprovechando así parte de la energía del viento.

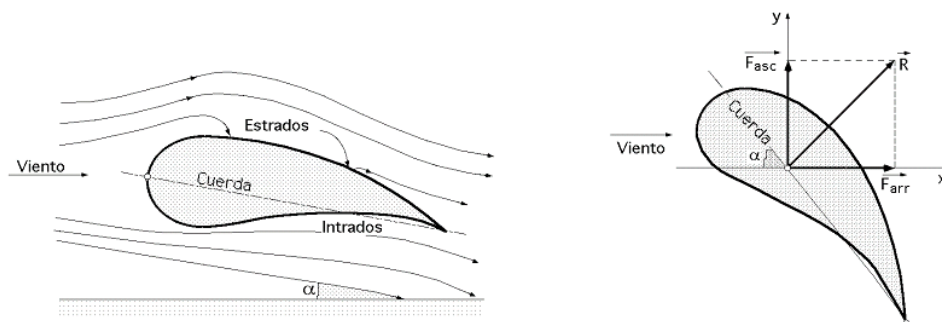
En el dibujo que se muestra a continuación se observa el ensamblaje entre el generador y las palas, también se puede ver mediante una transparencia la posición de los imanes (en azul) sobre el rotor:



2.3. PARTES DE UN PERFIL.

2.3.1. INTRODUCCIÓN.

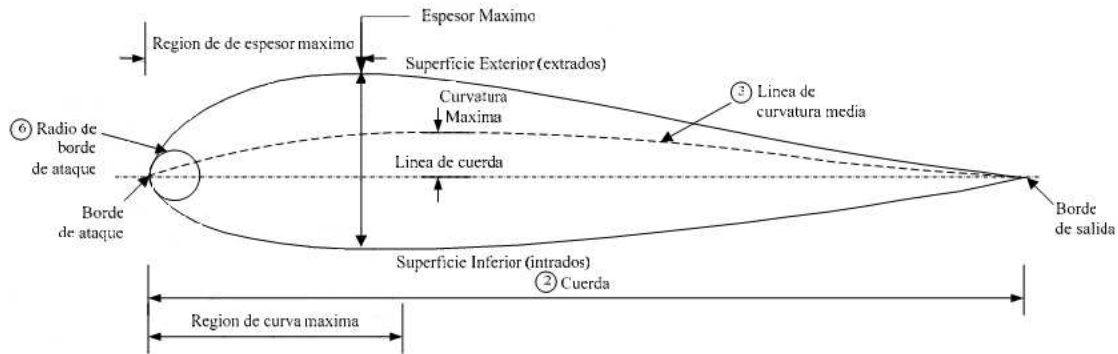
En éste apartado se describen las partes de un perfil aerodinámico.



Intradós: Es la parte del perfil que esta en sobrepresión.

Extradós: Es la parte del perfil que esta en depresión.

Si no se definen correctamente se pueden crear turbulencias en el extradós que reducen la energía cinética del aire.



Además, estos perfiles tienen un extremo romo, que es el borde de ataque mientras que el otro extremo, de forma afilada, es el borde de salida.

La línea de cuerda es una línea recta que une el borde de ataque y el borde de fuga del perfil.

La cuerda es la longitud de la línea anterior. Todas las dimensiones de los perfiles se miden en términos de la cuerda.

La línea de curvatura media es la línea media entre el extradós y el intradós.

Curvatura máxima es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda.

La posición de la curvatura máxima es importante en la determinación de las características aerodinámicas de un perfil.

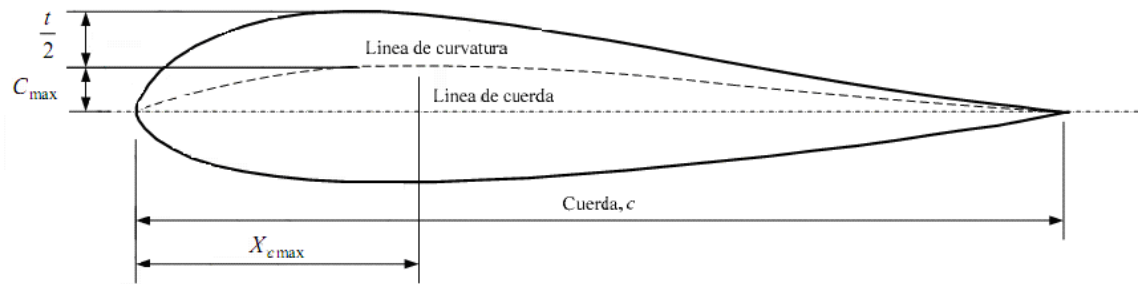
Espesor máximo es la distancia máxima entre la superficie superior e inferior (extradós e intradós).

La localización del espesor máximo también es importante.

Radio del borde de ataque es una medida del afilamiento del borde de ataque. Puede variar desde 0, para perfiles supersónicos afilados, hasta un 2 por 100 (de la cuerda) para perfiles más bien achatados.

En general, los tipos de perfiles utilizados en las máquinas eólicas rápidas son de la serie NACA (National Advisory Committee of Aeronautics), y vienen determinados por un conjunto de cifras que definen su geometría.

2.3.1.1 Nomenclatura de los perfiles NACA.

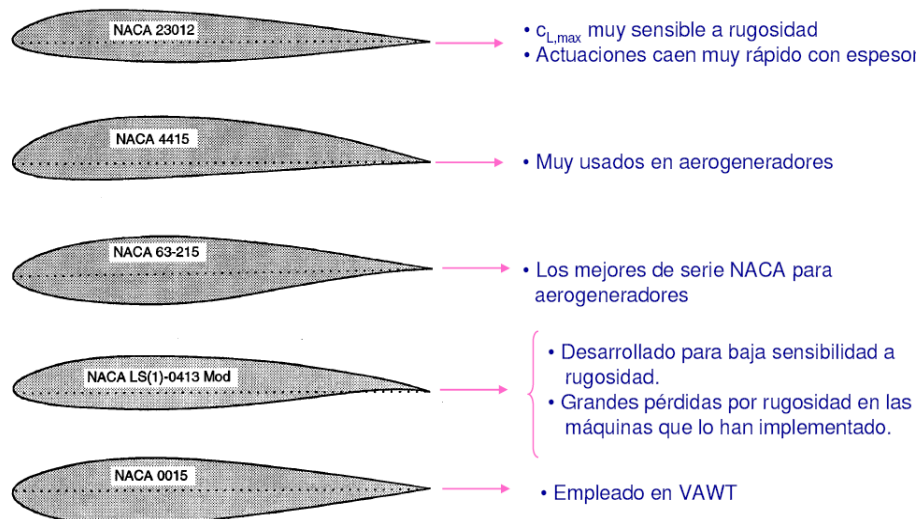


La primera cifra tiene un significado geométrico, e indica la máxima flecha de la línea media de la cuerda en porcentaje %, proporcionando la máxima curvatura C_{max} .

La segunda cifra tiene un significado geométrico, e indica su posición, es decir, la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de la máxima flecha de la línea media o máxima curvatura X_{cmax} .

Las dos últimas cifras indican el espesor relativo máximo en % respecto a la cuerda.

Perfiles aviación para eólica



En este proyecto se ha elegido el perfil NACA 4412 que por tener la cara inferior plana facilita su construcción.

Potencia del viento

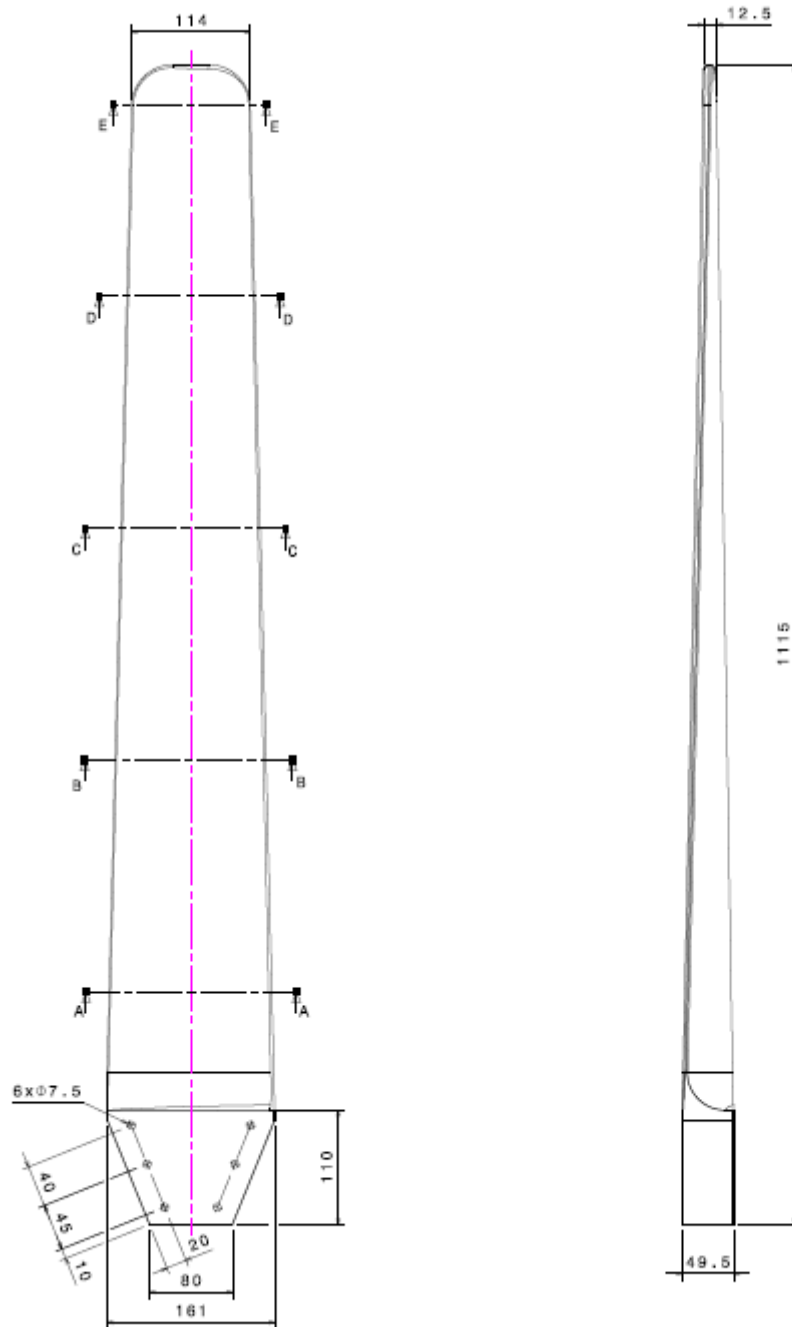
<i>m/s</i>	<i>W/m²</i>	<i>m/s</i>	<i>W/m²</i>	<i>m/s</i>	<i>W/m²</i>
0	0	8	313,6	16	2508,8
1	0,6	9	446,5	17	3009,2
2	4,9	10	612,5	18	3572,1
3	16,5	11	815,2	19	4201,1
4	39,2	12	1058,4	20	4900,0
5	76,5	13	1345,7	21	5672,4
6	132,3	14	1680,7	22	6521,9
7	210,1	15	2067,2	23	7452,3

Para una densidad del aire de $1,225 \text{ kg/m}^3$, correspondiente al aire seco a la presión atmosférica estándar al nivel del mar y a 15°C .

La fórmula para la potencia por m^2 en W es $0,5 * 1,225 * v^3$, donde v es la velocidad del viento en m/s .

Aviso:

Aunque la potencia del viento a una velocidad de , p.ej., 7 m/s es 210 W/m^2 , deberá observar que la potencia del viento en un emplazamiento con una velocidad del viento media de 7 m/s suele ser el doble. Esto es debido a la distribución de Weibull.



2.4. MATERIAL DE LAS PALAS.

Actualmente en la construcción de las palas de un aerogenerador comercial se someten a multitud de ensayos diferentes, como pueden ser ensayos a fatiga a flexión o incluso a impactos de rayos.

Después de todos estos estudios se ha llegado a la conclusión de que los mejores materiales que resisten bien este tipo de ensayos (a parte de tener una

buena relación calidad precio) son los plásticos reforzados con fibra de vidrio. Estos plásticos pueden ser poliéster o epoxi por ejemplo.

Otro material más moderno pero que todavía no se ha empezado a utilizar en aerogeneradores grandes debido a su alto costo es la fibra de carbono (Kevlar).

Los materiales compuestos llamados composites de madera, madera-epoxi, o madera-fibra-epoxi aún no han penetrado en el mercado de las palas de rotor, aunque existe un estudio en esa área.

Los materiales que se empleaban en las primeras máquinas eran las aleaciones de acero y de aluminio pero con el descubrimiento de otro tipo de materiales más ligeros y resistentes, pronto se dejaron de utilizar.

Con respecto a las palas de este proyecto, éstas van a pertenecer a las llamadas palas aerodinámicas, dentro de los posibles materiales que se encontraban a nuestro alcance (madera y fibra de vidrio), nos hemos decantado por las palas de madera por varios motivos importantes;

1. Su "fácil" aptitud a la hora de trabajar este material.
2. Su bajo costo, ya que los tres listones de madera necesarios son relativamente accesibles.
3. La fabricación de palas con fibra de vidrio exige un mayor costo y tiempo, ya que hay que partir de un molde previamente fabricado y calibrado.
4. La madera se comporta muy bien a esfuerzos de fatiga, flexión y sobretodo son ligeras. Aunque sí que es verdad que la fibra de vidrio también tiene estas cualidades.

Dentro de las propias maderas hay que tener muy en cuenta cual se debe elegir para esta aplicación. Está claro que hay que elegir un tipo de madera que guarde las cualidades anteriormente citadas (ligereza, resistencia a esfuerzos como flexión, fatiga, pandeo). Otro aspecto importante independientemente del tipo de madera que sea es que ésta tiene que estar seca y libre de nudos, para una mayor facilidad en el trabajo.

Después de investigar un poco en el mundo de las maderas se ha llegado a una serie de maderas que se podría utilizar. En esta lista se encuentran nombres como la del abeto, cedro, pino, roble americano, fresno, nogal...

El único inconveniente aparentemente importante es el deterioro de la pala, ya que ésta va a estar expuesta a todo tipo de agentes, tanto

meteorológicos como mecánicos. Por ello habrá que proporcionar a cada pala una protección.

Esta protección son productos como la pintura o el barniz.

En el caso en que se ponga pintura habrá que poner varias capas para una correcta impregnación de la pintura en la madera ,o en caso contrario, si utilizamos barniz como elemento de protección habrá que utilizar uno que nos garantice su protección tipo barniz de exteriores o "marino".

En cualquier caso habrá que llevar a cabo un mantenimiento anual para una larga duración de las palas.

En este caso como medida de protección se ha utilizado barniz.

2.5. CONSTRUCCION DE LAS PALAS.

2.5.1. INTRODUCCIÓN.

En éste apartado se acometerán los pasos para la construcción de las palas de este proyecto, separando la parte del extremo raíz de la parte aerodinámica de las palas.

2.5.1.1 Materiales.

Una vez adquiridos los tablones de madera de pino, sin nudos y seca de tamaño de 3x1x0,5 m., adquiridas en una carpintería, procedemos al marcado del rebaje de la madera que sobra debido a la forma aerodinámica de la pala.

2.5.1.2 El extremo raíz.

El extremo raíz es idéntico en cada pala y es necesario para ajustar cada pala al rotor del generador. Es por eso que las palas tienen dos partes, una primera que es perfil de ala de la pala que es la parte que capta la energía eólica, y una segunda parte en el extremo grueso donde se produce una suave transición entre el final del perfil de ala hacia la forma del extremo raíz.

El extremo raíz es igual para las 3 palas. A continuación se muestran los pasos necesarios para dar la forma deseada al extremo de una pala (pasos que deben realizarse de igual modo para todas las palas):

- En primer lugar se debe lijar la pieza para conseguir que de las dimensiones iniciales que tiene se rebajen un poco, sin tocar la zona de perfil de ala de la pala y conseguir una superficie uniforme.

En segundo lugar hay que ir tallando madera de la cara frontal del bloque raíz, que se une a la pala, hasta conseguir darle a esta cara una curvatura. La forma de la pala debe cambiar con suavidad de sección de un ala a una forma que permita el ensamblaje sobre el rotor del generador, requerirá de lijado y aplicación de barniz protector. Es muy importante que esta transición sea suave, de lo contrario se producirán grandes tensiones en la zona de la pala donde se une el perfil de ala al extremo raíz, debidas a los esfuerzos con el generador en funcionamiento encarado al viento. Esta unión se realiza con un formón y una lija una vez este acabado el perfil aerodinámico de la pala. Este segundo paso ha de realizarse una vez se haya concluido el modelado del perfil aerodinámico que se describe a continuación.

Este extremo raíz, no incluido en la longitud de la pala, consiste en un bloque de madera (extremo de la misma pieza que el resto de la pala).

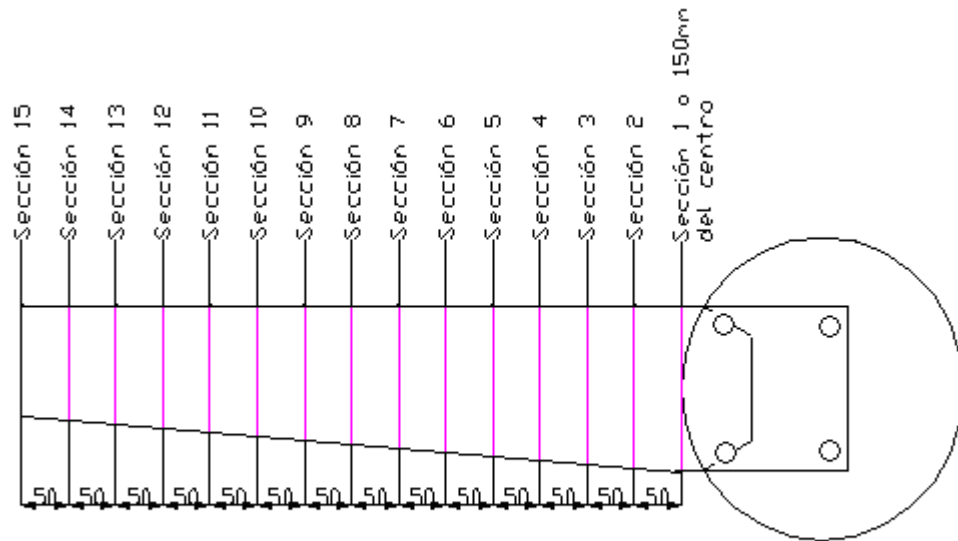
2.5.1.3 Perfil Aerodinámico.

Al ser un perfil NACA 4415 el extradós no requerirá una gran manipulación.

En primer lugar con una cepilladora eléctrica se procede al primer rebaje de la madera, ya que es un fragmento de madera grande a eliminar antes de proceder a las partes que necesitan más atención.



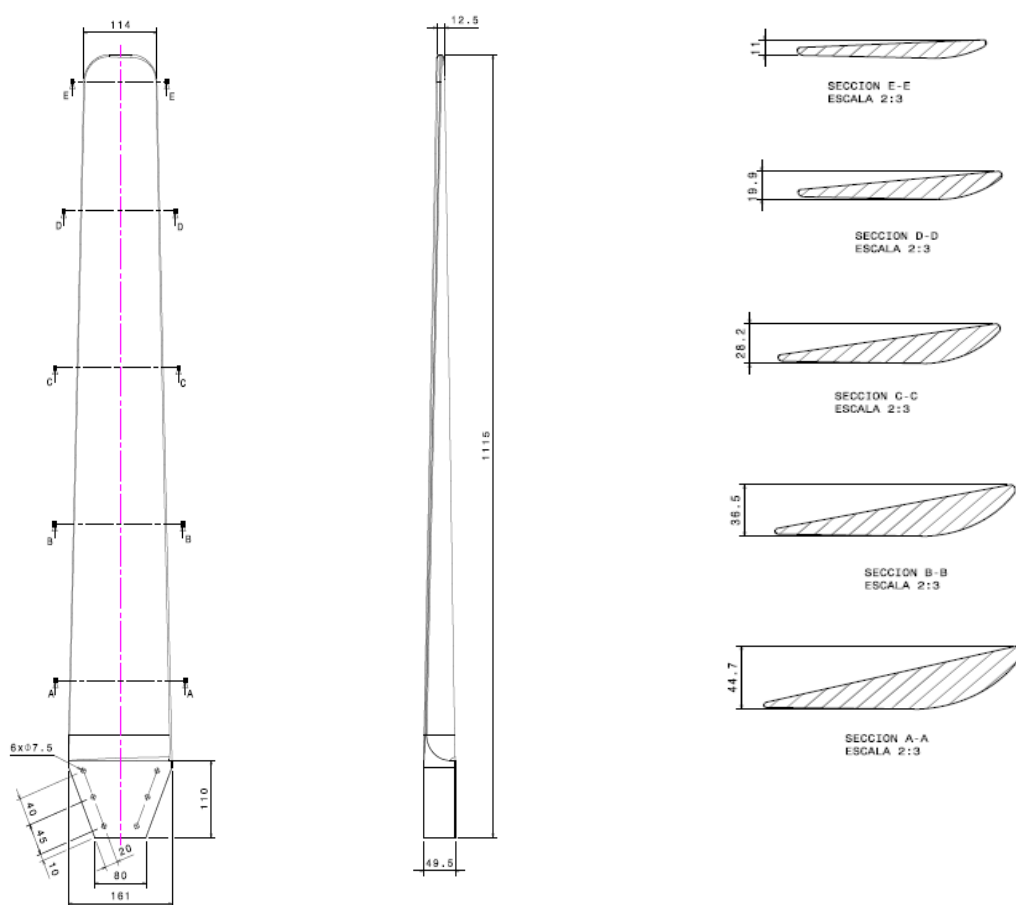
Una vez que se ha dejado la pala con la cepilladora cercana a la cantidad de madera que se necesita, procedemos a suprimir las rebabas que queden después del uso de la cepilladora. En este punto y en la parte aerodinámica de la pala se subdividirá en subpartes o secciones. Una sección es solamente una pequeña subdivisión para poder proceder al lijado de manera más precisa.



El proceso de suprimir rebabas se realiza con un cepillo a mano o especie de escofina hasta dejar la madera cerca de las medidas necesarias.

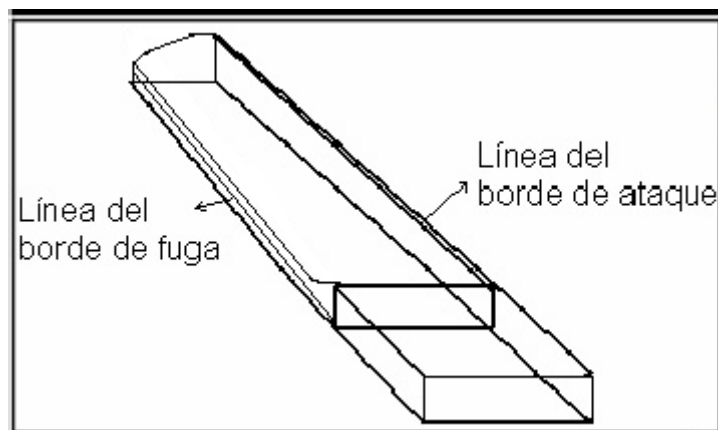


A continuación se dibujará con un lápiz en la testa del tablón la marca del perfil aerodinámico elegido, teniendo en cuenta el sentido de giro que tendrá la pala, en nuestro caso, sentido horario. Además se dibujará el borde de salida en el canto del madero según las cotas del dibujo.



La madera debe estar seca antes de empezarse a tallar.

Ahora hay que marcar las líneas del borde de ataque y del borde fuga. Las líneas se marcarán de la siguiente manera después de la rebaja del tablón explicada con la cepilladora eléctrica y con la guía que supone el dibujo anterior donde ya están expuestas las medidas:



Se marca con lápiz en la madera el punto correspondiente al borde de fuga para cada estación.

Se marca con lápiz en la pieza de madera un punto a la altura del borde de ataque de cada estación.

Después hay que unir estos puntos, quedando configurada la línea del borde de ataque de la pala. De manera que queda la pieza con ambas líneas dibujadas:

Empezando por el extremo más estrecho de la pieza hay que ir tallando sobre la pieza de madera poco a poco la forma curvada de la pala en cada sección.

Se debe ir tallando la pieza progresivamente entre secciones, obteniendo la forma deseada en cada sección.

En el proceso se han utilizado un banco, una cepilladora eléctrica, el cepillo de mano, la escofina o lima, un sargento, una cinta métrica además de un nivel para comprobar la cara plana del perfil.



2.5.1.4 Acabado de la superficie de la palas.

El acabado de la superficie es una característica importante debido a que la calidad de la superficie de las palas, dependerán de ello. Para obtener un buen acabado de la superficie de las 3 palas hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

Hay que lijar suavemente la superficie tallada hasta que sea lo más regular posible y aplicar el barniz marino protector repitiendo el proceso unas 3 veces en cada pala.

2.5.2 PREPARACIÓN DE LOS EXTREMOS RAÍZ DE LAS PALAS.

A continuación, se describe en primer lugar la preparación de los extremos raíz de palas.

Para acabar de dar la forma deseada al extremo raíz, hay que perforar 5 agujeros de 6 mm de diámetro, los cuales sirven para poder ajustar cada pala al generador de imanes permanentes.

Para marcar los agujeros se mide la longitud y anchura del extremo raíz y a cada tercio de distancia se traza una recta. A continuación se marca con un punzón el punto en las intersecciones de las rectas de manera que quede un agujero centrado en la línea más cercana al eje del rotor y otras dos filas con dos agujeros en cada fila de manera que al final tengamos 5 agujeros.

Ahora que ya se han marcado con el punzón los 5 centros de los agujeros, hay que perforarlos mediante un taladro con una broca para madera de 6 mm de diámetro que es el diámetro que se desea conseguir en los agujeros. Así se obtiene la siguiente figura:



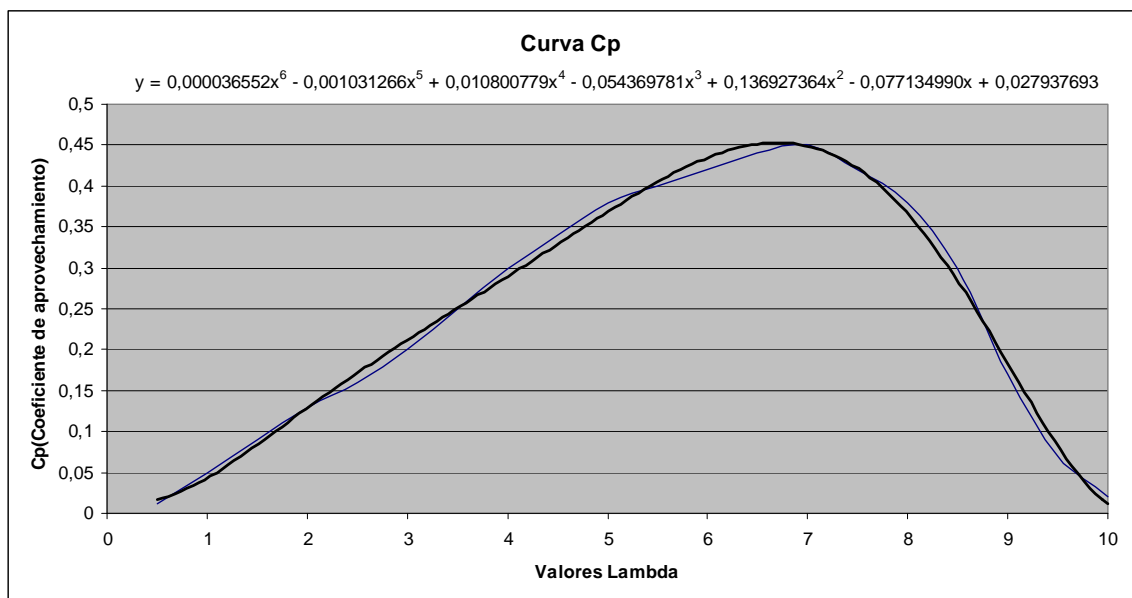
Al final obtendremos tres palas aerodinámicas.



2.5.3 CURVA CARACTERÍSTICA DE LAS PALAS.

En esta curva se puede observar los diferentes valores de C_p en función de λ , este coeficiente λ es el resultado del cociente de la velocidad de la punta de la pala y la velocidad de viento en ese momento determinado.

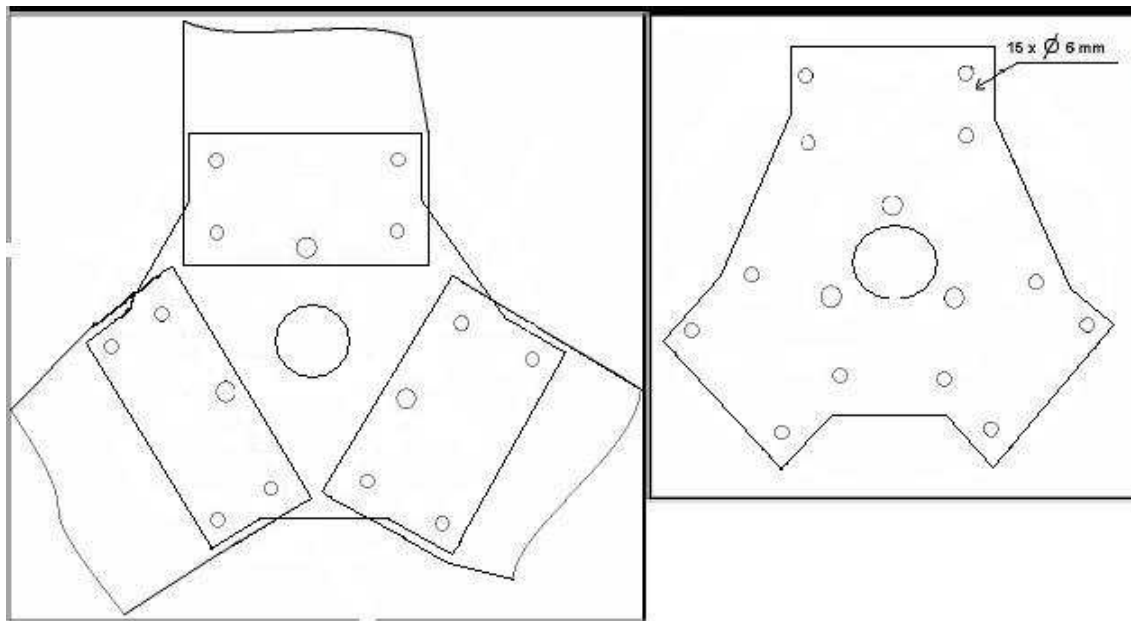
Tal y como se explica en la pagina 15 de la memoria la potencia entregada por las palas al generador es mayor cuanto mayor sea el valor de C_p , así que lo idóneo es mantenerse siempre en el punto más alto de la curva.



2.6. CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR.

Para el ensamblaje de las palas con el rotor se necesita un elemento que soporte las palas. Este elemento será una chapa de hierro adquirida en un chatarrero de grosor suficiente para soportar el peso de las palas y las fuerzas del viento. En este caso el grosor de esta chapa ha sido de 6 mm.

Una vez se dispone de este elemento se emplea una amoladora para darle al forma que queremos. Aquí se ha optado por darle una forma parecida a la de las tres palas. En el siguiente dibujo se ve un rotor parecido con otra forma del extremo raíz, los planos correspondientes a las palas de este proyecto se adjuntan en Anexos.



Para finalizar una buena opción utilizar el lateral del disco para limar en la medida de lo posible los bordes que acabamos de cortar y así evitar las virutas de hierro que pueden ocasionar daños.

Además de la forma dada se han de hacer los agujeros para atornillar las palas y el agujero central para que pase el eje del rotor del motor.

Los agujeros de los tornillos de las palas son de 6mm de diámetro mientras que el agujero del rotor es de 25 mm

2.7. LA VELETA.

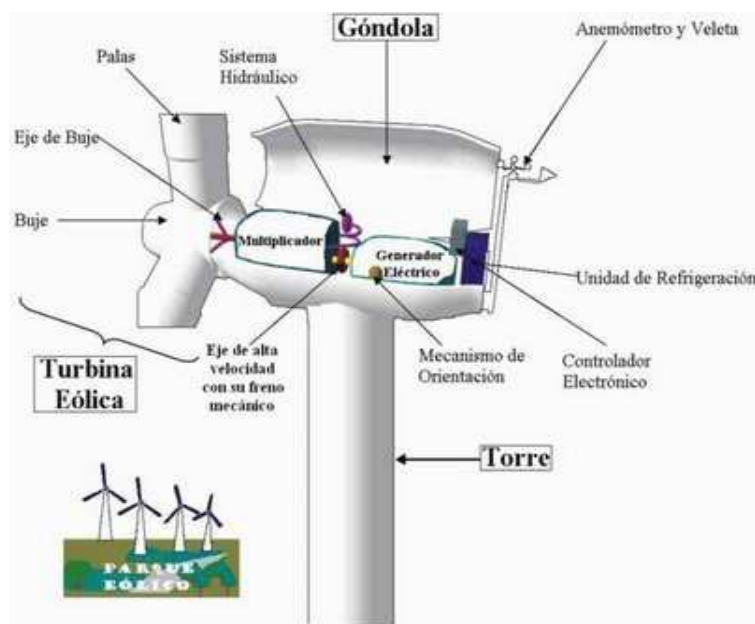
2.7.1. CONCEPTOS.

Tal y como se ha hecho hasta ahora se va a explicar el funcionamiento del timón de la eólica en aerogeneradores de tamaño industrial. En los aerogeneradores que se ven en las montañas para poner la eólica perpendicular al viento se usa un complejo mecanismo de orientación. Éste se basa fundamentalmente en una veleta ‘‘pequeña’’ la cual sirve para ponerse en orientación al viento, la cual manda una señal eléctrica a un motor que está colocado en la góndola, que hace que gire ésta orientando así perfectamente la eólica.

Evidentemente hay un claro inconveniente en eso y es que parte de la energía recaudada por el propio aerogenerador, se utiliza en el motor encargado en mover la góndola. También hay que decir que consume una energía insignificante si la comparamos con la que genera el propio aerogenerador.

Otra desventaja del uso de éste mecanismo es que la orientación de la eólica no se produce en todo cambio en la dirección del viento, es decir que la góndola empieza a moverse una vez haya cambiado la dirección del viento de manera considerable. Se puede decir que en este mecanismo la veleta asume un papel importante, es el sensor. Concepto importante comparado con el sistema de orientación de nuestro aerogenerador.

La razón por la que se usa éste mecanismo es evidente. Si únicamente colocáramos la veleta como mecanismo para orientar la eólica, ésta debería ser de unas proporciones gigantescas para poder mover la pesada góndola y claro está que colocar eso sería inviable además de peligroso.



En la foto de arriba se puede ver las partes más importantes de un aerogenerador convencional, entre ellas se observa el mecanismo de orientación hablado anteriormente.

Otra forma de orientación al viento consiste en hacer que la hélice funcione «de espaldas al viento» sin veleta, haciendo que la presión del viento sobre la hélice mantenga el molino orientado. Este sistema sólo es factible con hélices de palas huecas, que se refrenan con velocidades altas. Hay otro sistema, sólo utilizado en grandes molinos (mayor de 10 ó 12 m). Consiste en utilizar unas hélices auxiliares o molinete de orientación, tal y como se puede ver en la figura siguiente.

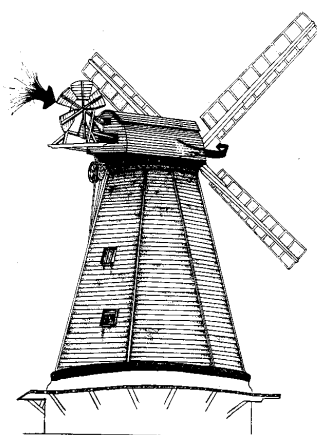
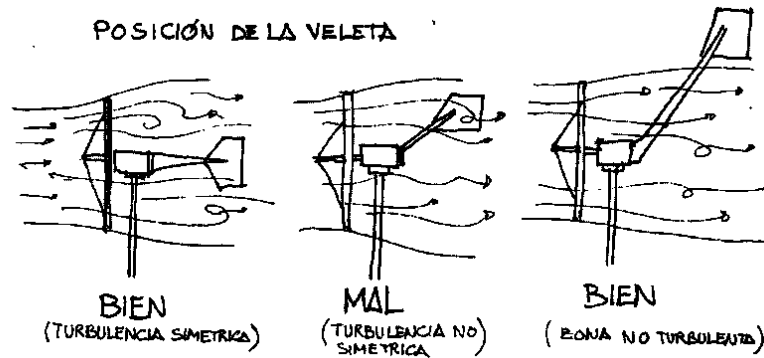


Figure 1. A Dutch Windmill

En lo referente a este proyecto el mecanismo utilizado para la orientación de la eólica se ha utilizado únicamente una veleta hecha artesanalmente. Se ha optado por el uso de la veleta por su simplicidad frente al mecanismo de

orientación y por su fácil construcción. Una de los puntos a tener en cuenta es la correcta colocación de la veleta, ya que en función de su colocación se producirán vibraciones debido a las turbulencias. Las vibraciones no son malas a corto plazo pero sí a largo plazo, ya que se pueden deteriorar los rodamientos, por fuerzas axiales, que sujetan a la góndola.



En su momento se decantó por poner la veleta a la misma altura que la góndola debido a que resultaba algo más sencillo que ponerla a otro nivel. La veleta, se coloca a una distancia del eje sobre el que pivota el aerogenerador, comprendida entre 0,75 y 1 veces el diámetro de la hélice.

En la fotografía de a continuación se observa el contrapeso que se puso en la cola de la veleta para evitar las vibraciones de todo el conjunto, ya que a largo plazo éstas pueden ser las causantes de holguras y posibles roturas en el aerogenerador. Se colocó un tornillo medianamente grande para que absorbiera las vibraciones.



La superficie de la veleta es variable, pero suele ser de un 2 a un 15% del área barrida por la hélice. Hay que decir que cuanto más pequeña sea la veleta, más suaves serán las reorientaciones del molino, pero la orientación será menos

precisa. La mayoría de las veces se hace de forma que la silueta del molino resulte bonita.

A continuación se muestra la veleta en la que se observa varias cosas:



- Todas las puntas están redondeadas para evitar el efecto punta
- Los cantos están cubiertos de una goma para evitar la corrosión
- Ésta veleta está colocada sobre unos angulares que permiten diferentes puntos de colocación de la veleta.
- Se observa que en el extremo hay un peso colocado para evitar vibraciones
- La pintura tiene varias misiones: evitar la corrosión y adornar la propia veleta.

Todas las veletas se deben colocar de manera que no estén sujetas rígidamente al armazón del molino. La veleta debe gozar de cierta movilidad que impida orientaciones bruscas al actuar por ráfagas (son muy peligrosas para la hélice) porque estas orientaciones bruscas reducen mucho la vida del molino.

El peso de la veleta debe ser suficiente para equilibrar aproximadamente el peso de la hélice y del cuerpo del molino sobre el eje vertical de fijación. Otra pauta importante que hay que tener en cuenta es que la veleta debe tener todas sus esquinas redondeadas para que no se produzca el efecto punta y no atraiga los rayos.

2.7.2. TIMON DE LA EOLICA.

Para la construcción de la veleta se siguió unos pasos:

- Obtención de la chapa base, con un grosor de 5mm de grosor
- Mediante la amoladora se consiguió más o menos darle la forma redondeada que tiene.
- Se pulieron los cantos, para conseguir la eliminación de las rebabas de la chapa con una lima y un papel de lija para el acabado.
- Se pintó toda la superficie de la veleta para protegerla frente a los agentes atmosféricos, como el óxido.
- Se recubrieron con goma los cantos de las esquinas, ya que esa es la parte más susceptible de óxido.
- Las dimensiones de la veleta son 55cm de largo por 34cm en su punto más alto.

A continuación se adjunta un cuadro explicativo en el que se observa las diferentes presiones que el aire ejerce sobre la paleta desorientadora a diferentes velocidades del viento.

Para hacer estos cálculos se ha supuesto que el área de la veleta es de 1870 cm².

Como se puede observar la presión varía entre 0.15 N/M para un viento de 0.5 M/s y 1109.4 N/M para un viento de 43 M/s.

La fórmula utilizada para averiguar las presiones es la siguiente:

$$Presionviento = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

En la cual se ha tomado como densidad del aire 1.2 Kg/m³

VELOCIDAD DEL VIENTO (M/S)	PRESIÓN DEL VIENTO (N/M ²)
0.5	0.15
1	0.6
2	2.4
4	9.6
8	38.4
10	60
15	135
19	216.6
23	317.4
26	405.6
28	470.4
34	693.6
36	777.6
40	960
43	1109.4

Para calcular la Fuerza del viento se multiplica la Presión del viento por el Área de la veleta que es de 1870 cm² o lo que es lo mismo 0.187 m²

PRESIÓN DEL VIENTO (N/M ²)	FUERZA DEL VIENTO (N)
0.15	0,02805
0.6	0,1122
2.4	0,4488
9.6	1,7952
38.4	7,18
60	11,22
135	25,245
216.6	40,392
317.4	59,279
405.6	75,847
470.4	87,89
693.6	129,7
777.6	145,5
960	179,52
1109.4	207,45

Esta tabla que se adjunta a continuación es el resultado de las dos anteriores. En ella se refleja el par mecánico que ejerce el viento sobre la paleta

(en función de la distancia entre ella misma y el eje de rotación) y la propia fuerza del viento.

En la tabla se observa el caso más desfavorable que es el de 414,9 Nm, que sería el par ejercido para una distancia de 2m entre la veleta y el eje de rotación y para una fuerza del viento de 207,45 N (equivalente a 43 M/s).

Distancia (m)	0	0,5	1	1,5	2
Fuerza del Viento (N)					
0,0281	0,00	0,01	0,03	0,04	0,06
0,1122	0,00	0,06	0,11	0,17	0,22
0,4488	0,00	0,22	0,45	0,67	0,90
1,7952	0,00	0,90	1,80	2,69	3,59
7,180	0,00	3,59	7,18	10,77	14,36
11,220	0,00	5,61	11,22	16,83	22,44
25,245	0,00	12,62	25,25	37,87	50,49
40,392	0,00	20,20	40,39	60,59	80,78
59,279	0,00	29,64	59,28	88,92	118,56
75,847	0,00	37,92	75,85	113,77	151,69
87,89	0,00	43,95	87,89	131,84	175,78
129,70	0,00	64,85	129,70	194,55	259,40
145,50	0,00	72,75	145,50	218,25	291,00
179,52	0,00	89,76	179,52	269,28	359,04
207,45	0,00	103,73	207,45	311,18	414,90

2.7.2. ESTRUCTURA DE LA VELETA.

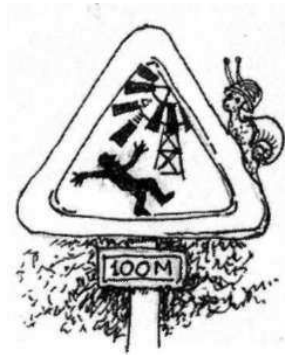
Esta estructura es la encargada de sujetar la propia veleta y de mantenerla a una distancia del eje de rotación del molino. Su construcción fue la siguiente:

- Obtención de los tubos de 1 cm de diámetro.
- Se sueldan entre si formando un triangulo de 55mm de hipotenusa, 53 mm de cateto opuesto y 32 mm del otro cateto, en el cual se coloca el eje por el que pivotará la veleta entera.
- Se pintó para tener una protección frente al oxido.

2.8. SISTEMA DE REGULACIÓN DE POTENCIA.

A continuación se procede a la enumeración de los sistemas de regulación considerados y la opción elegida.

Un sistema de regulación en un molino es indispensable para evitar la destrucción del molino en caso de fuerte viento o vendaval de manera que permita pararse o desorientarse del viento dominante. Un molino sin un sistema de regulación es muy probable que se rompa con el primer viento fuerte.



Además no debe perderse de vista el aspecto económico del problema, generalmente las máquinas de este tipo son diseñadas para producir energía eléctrica lo más barata posible. Por tal razón, en su diseño se adopta un sistema tal que cuando el viento alcance determinada velocidad (velocidad de corte), predeterminada durante la etapa de diseño, la máquina disminuya la cantidad de energía captada del viento.

Se pueden distinguir principalmente dos tipos de frenado .El frenado automático y el manual.

- Se puede definir el frenado automático como aquel capaz de disminuir la velocidad de forma independiente, es decir sin que sea accionado por ninguna persona. Éste tipo de frenado (si esta bien calibrado) puede ser de gran utilidad. Nos podemos poner en el caso que se tenga una vivienda aislada y necesitemos que el aerogenerador siga funcionando y cargando las baterías mientras la casa está vacía y se pare automáticamente si hay exceso de velocidad protegiendo así la integridad del aparato. En la fotografía se observa la forma y tamaño de la paleta desorientadora hecha para el proyecto, su función es la que se explica más adelante.



- El otro tipo de frenado es el llamado manual. Éste frenado se realiza como su propio nombre indica con la acción de una persona. Éste sistema nos servirá en el caso en el que la vivienda esté habitada ya que así se podrá accionar cuando uno desee, como por ejemplo en el caso en que las baterías ya estén a plena carga y no sea necesario meter más carga, ya que en ese caso podríamos llegar a deteriorarlas o bien en el supuesto caso en que empiece un vendaval o un aire fuerte ya que como se ha explicado anteriormente unas velocidades incontroladas son muy perjudiciales para la máquina.

Se va a empezar explicando el sistema de regulación de la eólica que utilizan los aerogeneradores convencionales que se observan hoy en día en todas las montañas.

Antes de comenzar a explicar los controles se debe saber que los aerogeneradores están diseñados para producir energía eléctrica de la forma más barata posible.

Así pues, están generalmente diseñados para rendir al máximo a velocidades alrededor de 15 m/s. Es mejor no diseñar aerogeneradores que maximicen su rendimiento a vientos más fuertes, ya que los vientos tan fuertes no son comunes.

En el caso de vientos más fuertes es necesario gastar parte del exceso de la energía del viento para evitar daños en el aerogenerador.

En consecuencia, todos los aerogeneradores están diseñados con algún tipo de control de velocidad o de potencia porque ambas variables son dependientes.

Hay dos formas de hacerlo con seguridad en los modernos aerogeneradores:

Aerogeneradores de regulación por cambio del ángulo de paso ("pitch controlled") y Aerogeneradores de regulación por pérdida aerodinámica ("stall controlled").

2.8.1. CAMBIO DEL ÁNGULO DE PASO ("PITCH CONTROLLED").

En un aerogenerador de regulación por cambio del ángulo de paso, el controlador electrónico de la turbina comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando ésta alcanza un valor demasiado alto, el controlador envía una orden al mecanismo de cambio del ángulo de paso, que inmediatamente hace girar las palas del rotor ligeramente fuera del viento. Y a la inversa, las palas son vueltas hacia el viento cuando éste disminuye de nuevo.

Así pues, las palas del rotor deben ser capaces de girar alrededor de su eje longitudinal (variar el ángulo de paso).

Hay que observar que mientras se está haciendo el control por pitch el rotor sigue girando, eso si a una velocidad mucho menor, con lo que la potencia generada también será menor.

El diseño de aerogeneradores controlados por cambio del ángulo de paso requiere una ingeniería muy desarrollada, para asegurar que las palas giren exactamente el ángulo deseado. En este tipo de aerogeneradores, el ordenador generalmente girará las palas unos pocos grados cada vez que el viento cambie, para mantener un ángulo óptimo que proporcione el máximo rendimiento a todas las velocidades de viento, este mecanismo que se encarga de mover las palas suele funcionar de forma hidráulica.

2.8.2. REGULACIÓN POR PÉRDIDA AERODINÁMICA ("STALL CONTROLLED") DE FORMA PASIVA.

Los aerogeneradores de regulación (pasiva) por pérdida aerodinámica tienen las palas del rotor unidas al buje en un ángulo fijo.

Sin embargo, el perfil de la pala ha sido aerodinámicamente diseñado para asegurar que, en el momento en que la velocidad del viento sea demasiado alta, se creará turbulencia en la parte de la pala que no da al viento. Esta pérdida de sustentación evita que la fuerza ascensional de la pala actúe sobre el rotor.

Un concepto importante en la aerodinámica es el siguiente .La pérdida de sustentación quiere decir que conforme aumenta la velocidad real del viento en

la zona, el ángulo de ataque de la pala del rotor también aumentará, hasta llegar al punto de empezar a perder sustentación.

Si se estudia la geometría de una pala del rotor de un aerogenerador regulado por pérdida aerodinámica se observa que la pala está ligeramente torsionada a lo largo de su eje longitudinal. Esto es así en parte para asegurar que la pala pierde la sustentación de forma gradual, en lugar de hacerlo bruscamente lo cual podría ser nefasto para la integridad de las palas, cuando la velocidad del viento alcanza su valor crítico.

La principal ventaja de la regulación por pérdida aerodinámica es que se evitan las partes móviles del rotor y un complejo sistema de control. Por otro lado, la regulación por pérdida aerodinámica representa un problema de diseño aerodinámico muy complejo, y comporta retos en el diseño de la dinámica estructural de toda la turbina, para evitar las vibraciones provocadas por la pérdida de sustentación. Alrededor de las dos terceras partes de los aerogeneradores que actualmente se están instalando en todo el mundo son máquinas de regulación por pérdida aerodinámica.

2.8.3. REGULACIÓN POR PÉRDIDA AERODINÁMICA DE FORMA ACTIVA.

Un número creciente de grandes aerogeneradores (a partir de 1 MW) están siendo desarrollados con un mecanismo de regulación activa por pérdida aerodinámica.

Técnicamente, las máquinas de regulación activa por pérdida aerodinámica se parecen a las de regulación por cambio del ángulo de paso, en el sentido de que ambos tienen palas que pueden girar. Para tener un momento de torsión (fuerza de giro) razonablemente alto a bajas velocidades del viento, este tipo de máquinas serán normalmente programadas para girar sus palas como las de regulación por cambio del ángulo de paso a bajas velocidades del viento y aquí está la diferencia.

Sin embargo, cuando la máquina alcanza su potencia nominal observará que este tipo de máquinas presentan una gran diferencia respecto a las máquinas reguladas por cambio del ángulo de paso: si el generador va a sobrecargarse, la máquina girará las palas en la dirección contraria a la que lo haría una máquina de regulación por cambio del ángulo de paso. En otras palabras, aumentará el ángulo de paso de las palas para llevarlas hasta una posición de mayor pérdida de sustentación, y poder así consumir el exceso de energía del viento.

Una de las ventajas de la regulación activa por pérdida aerodinámica es que la producción de potencia puede ser controlada de forma más exacta que con la regulación pasiva, con el fin de evitar que al principio de una ráfaga de

viento la potencia nominal sea sobrepasada. Otra de las ventajas es que la máquina puede funcionar casi exactamente a la potencia nominal a todas las velocidades de viento. Un aerogenerador normal de regulación pasiva por pérdida aerodinámica tendrá generalmente una caída en la producción de potencia eléctrica a altas velocidades de viento, dado que las palas alcanzan una mayor pérdida de sustentación.

El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele operarse mediante sistemas hidráulicos o motores eléctricos paso a paso.

La elección de la regulación por cambio de paso es sobretodo una cuestión económica, de considerar si vale o no la pena pagar por la mayor complejidad de la máquina que supone el añadir el mecanismo de cambio de paso de la pala.

2.9. POSIBLES METODOS DE REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD EN ESTE PROYECTO.

2.9.1. VARIACIÓN DEL ÁREA DE CAPTACIÓN.

El principio fundamental de este sistema es reducir el área de captación o área del rotor en posición perpendicular a la corriente de aire incidente cuando la velocidad supera cierto valor crítico o de corte.

Al incidir el viento sobre el rotor se genera sobre éste una fuerza en la dirección y sentido de la corriente de aire. Si el eje del rotor, lugar donde se aplica esta fuerza, no pertenece al plano vertical que contiene al eje de la torre según la dirección del viento, se producirá un momento que desalineará al rotor respecto a la dirección del viento. Si es limitado este giro mediante un resorte calibrado unido por un lado al rotor y por el otro a la estructura de la cola del molino se logra que solamente cuando existan corrientes de aire a velocidades superiores a la nominal se presente la desalineación mencionada, llamándose este sistema "furling".

El principal inconveniente es que en estos sistemas resulta característico una fuerte vibración que inducirían peligrosos esfuerzos de fatiga de naturaleza irregular en toda la estructura. Estas se deben a que el viento incidente no posee un comportamiento estable en el tiempo y por tanto las cargas sobre el rotor también serán irregulares; de este modo a velocidades cercanas a la velocidad crítica se sucederán situaciones de un equilibrio casi inestable, provocando oscilaciones desde la posición del eje del rotor, que golpean el tope del soporte.

Además de necesitarse una estructura que permita soportar a la maquina y las palas lo que complicaría en exceso el motivo de este proyecto. Se

desprende de lo analizado, que no resulta viable incorporar este tipo de regulación al diseño que se pretende realizar.

2.9.2. CORTOCIRCUITO DEL GENERADOR.

Otro posible mecanismo de regulación de velocidad puede ser el de cortocircuitar el generador. Éste mecanismo se basa en el fenómeno por el cual al realizar un cortocircuito se generan unas corrientes que a su vez generan un campo magnético que impide el giro del propio rotor produciéndose así el frenado de la máquina.

Éste mecanismo puede diseñarse para que actúe de manera automática, es decir, que cuando el sensor que detecta el exceso de velocidad mande una señal eléctrica al circuito electrónico el cual, mediante un contacto logre cortocircuitar el estator del generador. Es importante que este cortocircuito se produzca entre la salida de la energía eléctrica del generador y el puente rectificador de diodos, ya que de no ser así se podría dañar irreversiblemente el puente.

Por lo tanto el sensor y el circuito encargado de juntar las fases del generador deben ir colocados en la estructura del aerogenerador, lo más cerca posible de la máquina.

Los inconvenientes que presenta este sistema son los siguientes:

Coste del sensor de velocidad

Coste de la electrónica

Brusquedad en el frenado, ya que un cortocircuito en el estator implica un frenado casi instantáneo.

Éste último punto tiene especial importancia ya que realizar el frenado instantáneo de algo que está en movimiento es bastante negativo para todas las piezas en general, con especial importancia para las que están en movimiento.

Existe una solución a este problema del frenado brusco que puede ser el de intercalar una resistencia entre el circuito, el cual produce el cortocircuito y el propio generador. Al colocar esta resistencia lo que estamos consiguiendo es que el frenado sea mucho más progresivo ya que el cortocircuito no será instantáneo. También habrá que elegir la resistencia adecuada, ya que si esta es de valor muy elevado el frenado será muy lento y viceversa.

En referencia a nuestro proyecto se ha descartado este sistema de frenado debido a su complejidad ya que la colocación del sensor requiere de mucho trabajo y alto coste.

2.9.3. METÓDO ADOPTADO. PALETA DESORIENTADORA.

Cuando por construcción, el eje de la hélice queda justo encima del eje sobre el que pivota el molino, debemos colocar una paleta desorientadora. Cuando el viento es fuerte, la paleta tiende a desorientar a toda la hélice reduciendo su velocidad. El inconveniente de utilizar éste tipo de regulación es que siempre va a pivotar algo el aerogenerador ya que aunque haga poco viento éste seguirá haciendo una fuerza sobre la paleta que desviará la eólica de su incidencia óptima, eso sí, esa desviación será casi despreciable.

En la foto adjuntada a continuación se distingue entre otras cosas la paleta desorientadora con su estructura y colocación en el punto de rotación del aerogenerador.



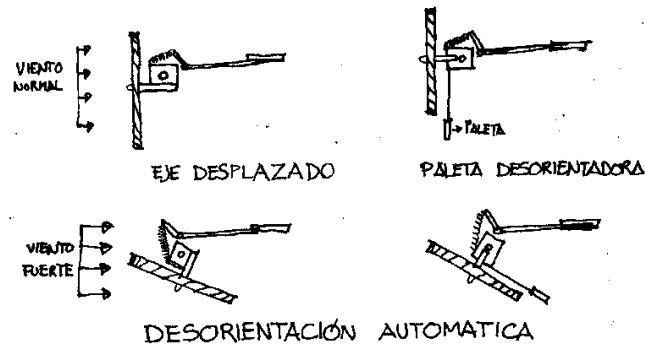
Las ventajas que tiene son evidentes, son por ejemplo: un bajo coste, fácil de fabricar, mantenimiento nulo y buen rendimiento, y son estas las razones por las que se ha usado éste tipo de regulación.

La paleta debe sobresalir de la superficie barrida por la hélice y su tamaño debe ser la cuarta o quinta parte de la superficie de la veleta.

La desorientación supone un cambio del plano de giro de la hélice y esto produce fuerzas giroscópicas que deben ser suaves y regulares. Para que este cambio de plano sea suave y sin saltos, la hélice debe tener simetría en los momentos de inercia respecto a cualquier eje de giro.

Esto se traduce en emplear hélices múltiples, tradicionales, hélices aerodinámicas tripalas, pero nunca bipalas.

Existen otro tipo de regulación menos comunes, como pueden ser la de pala a posición bandera, por cabeceo, o cortocircuito del generador.



2.9.3.1 FUERZAS EN LA PALETA.

Para su construcción se siguieron unas pautas:

Se consiguió un tubo de hierro de 18mm de grosor de 112 mm de largo.

Se fabricó mediante un trozo de madera de 3.5mm de grosor y 5cm de largo la contra veleta.

Se unió el tubo al eje de rotación mediante soldadura.

Se unieron entre sí, (el tubo y la contra veleta mediante unos tornillos)



A continuación se adjunta un cuadro explicativo en el que se observa las diferentes presiones que el aire ejerce sobre la paleta desorientadora a diferentes velocidades del viento.

Para hacer estos cálculos se ha supuesto que el área de la paleta desorientadora es de 100 cm². Como se puede observar la presión varía entre 0.15 N/M para un viento de 0.5 M/s y 1109.4 N/M para un viento de 43 M/s

La fórmula utilizada para averiguar las presiones es la siguiente:

$$Presionviento = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

En la cual se ha tomado como densidad del aire 1.2 Kg/m³

VELOCIDAD DEL VIENTO (M/S)	PRESIÓN DEL VIENTO (N/M)
0.5	0.15
1	0.6
2	2.4
4	9.6
8	38.4
10	60
15	135
19	216.6
23	317.4
26	405.6
28	470.4
34	693.6
36	777.6
40	960
43	1109.4

En esta otra tabla se ve la fuerza ejercida por el viento en Newton. Para realizar los cálculos únicamente se ha tomado el producto de la presión ejercida sobre el viento (antes calculado) y el área de la paleta desorientadora.

Se puede observar como la fuerza del viento llega a ser de 11.094 N para un viento de 43 M/s

PRESIÓN DEL VIENTO (N/M)	FUERZA DEL VIENTO (N)
0.15	0,0015
0.6	0,006
2.4	0,024
9.6	0,096
38.4	0,384
60	0,6
135	1,35
216.6	2,166
317.4	3,174
405.6	4,056
470.4	4,704
693.6	6,936
777.6	7,776
960	9,6
1109.4	11,094

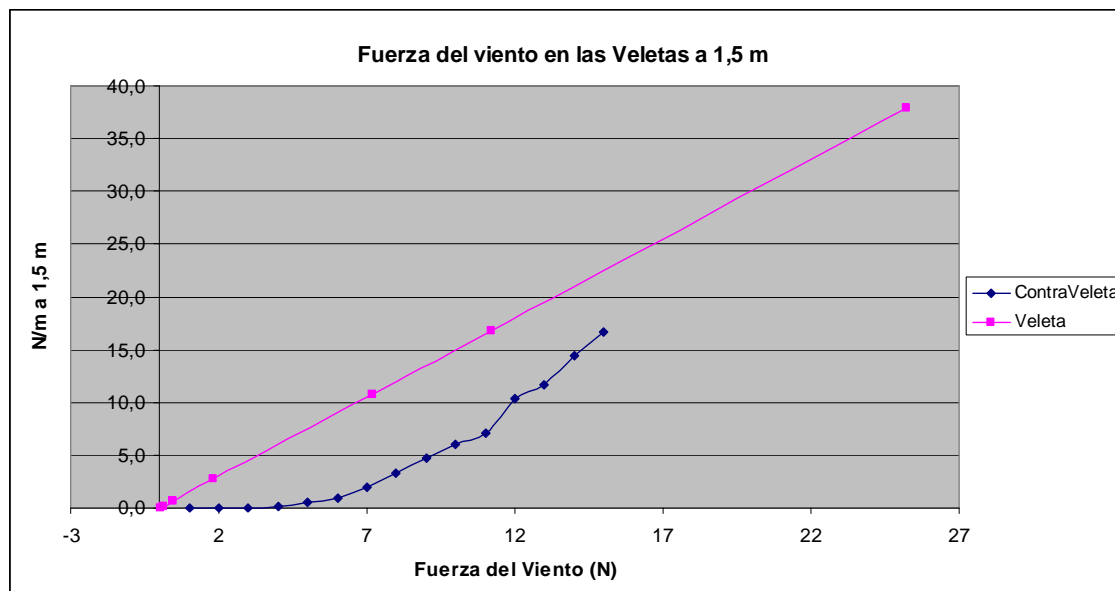
Esta tabla que se adjunta a continuación es el resultado de las dos anteriores. En ella se refleja el par mecánico que ejerce el viento sobre la paleta (en función de la distancia entre ella misma y el eje de rotación) y la propia fuerza del viento.

En la tabla se observa el caso más desfavorable que es el de 22.188 Nm, que sería el par ejercido para una distancia de 2m entre la paleta y el eje de rotación y para una fuerza del viento de 11.094 N (equivalente a 43 M/s)

2.9.4. DISTANCIAS ENTRE PALETA Y EJE DE ROTACION (M).

Distancia (m)	0	0.5	1	1.5	2
Fuerza del Viento (N)					
0.0015	0	0.00075	0.0015	0.00225	0.003
0.006	0	0.003	0.006	0.009	0.012
0.024	0	0.012	0.024	0.036	0.048
0.096	0	0.048	0.096	0.144	0.192
0.384	0	0.192	0.384	0.576	0.768
0.6	0	0.3	0.6	0.9	1.2
1.35	0	0.675	1.35	2.025	2.7
2.166	0	1.083	2.166	3.249	4.332
3.174	0	1.587	3.174	4.761	6.348
4.056	0	2.028	4.056	6.084	8.112
4.704	0	2.352	4.704	7.056	9.408
6.936	0	3.468	6.936	10.404	13.872
7.776	0	3.888	7.776	11.664	15.552
9.6	0	4.8	9.6	14.4	19.2
11.094	0	5.547	11.094	16.641	22.188

Grafica de representación de la fuerza del viento en la veleta y contra veleta a 1,5 m de distancia.



Para que la contra veleta desoriente el molino de la dirección del viento, habrá que colocar un muelle a tracción que tenga la constante necesaria para que al realizar el viento una fuerza suficiente en la contra veleta, esta, al realizar

la fuerza suficiente en el muelle este se tense provocando la desorientación de la góndola respecto de la veleta.

Como se ha decidido que el molino se desoriente automáticamente para vientos superiores a 11 m/s, o lo que es lo mismo, una presión de 60 N/m que corresponde a una fuerza de 0,6 N debido a la superficie de la contra veleta.

Este muelle además de ser el responsable del freno automático, también es el encargado del freno manual que posteriormente se describe, ya que tanto la sirga del freno manual como la resistencia que genera la contra veleta al fuerte viento lo que hacen es tensar o destensar el muelle según sea el caso para orientar o desorientar la veleta del sistema formado por el motor y las palas.

2.9.5. DESORIENTACIÓN MANUAL.

La desorientación manual es el sistema más efectivo para detener un aerogenerador por los motivos que ya se han comentado anteriormente.

Esta foto de abajo muestra la unión entre la estructura de la veleta y la estructura del aerogenerador. Su misión es que en el momento en que accionamos el freno manual, impedir la apertura en exceso entre la veleta y la estructura del aerogenerador. Ya que cuando usamos el freno manual, el timón de la eólica, deja de estar en dirección al viento para ponerse en cualquier otra posición.

Para impedir que la veleta pegue tirones entre ella misma y la estructura del molino, producidos por el viento, se coloca un muelle para absorber esos malos tirones e impedir la posible rotura de la cadena.



Se puede ver el funcionamiento del sistema de desorientación en el dibujo mostrado en al final del apartado.

El funcionamiento más o menos es el siguiente: La veleta se mantiene en su posición normal sujeta entre los muelles 1 y 3 que permiten la movilidad necesaria. Al tirar de la sirga (2), la hélice se coloca en posición de trabajo frente al viento. Esta sirga lleva un muelle duro en el extremo para que una vez desorientado el anclaje no sea totalmente rígido ya que de lo contrario, una ráfaga puede romper la sirga.

A continuación se muestra en las siguientes fotografías los muelles explicados en el anterior párrafo.



Por si fallan los muelles se colocan cadenas de seguridad. En caso de rotura de cadenas, muelles o sirgas, el molino se para solo. La desorientación manual debe plegar el molino en la misma dirección que lo haga la automática.

En el proyecto se ha optado por la utilización de éste sistema de regulación automática, ya que viene bien debido a la opción de poder parar la maquina en momentos en los que se ausenten los habitantes de la casa.

Esta otra fotografía aunque un poco desenfocada muestra el tope que tiene la estructura para impedir una fuerte colisión entre la veleta y el molino. Ésta pieza es un taco de goma de la pata de una silla.



Las fotografías mostradas a continuación muestran el recorrido de la sirga de acero recorriendo la estructura del aerogenerador.

Lo que a nosotros nos interesa es la funda de color crema que se observa, a través de esta funda se localiza la sirga actuadora del freno manual. Al fondo de la imagen la sirga se introduce por el interior del eje, por el cual pivota todo el molino, y baja a través del interior de la torre para ser accionado manualmente por nosotros.

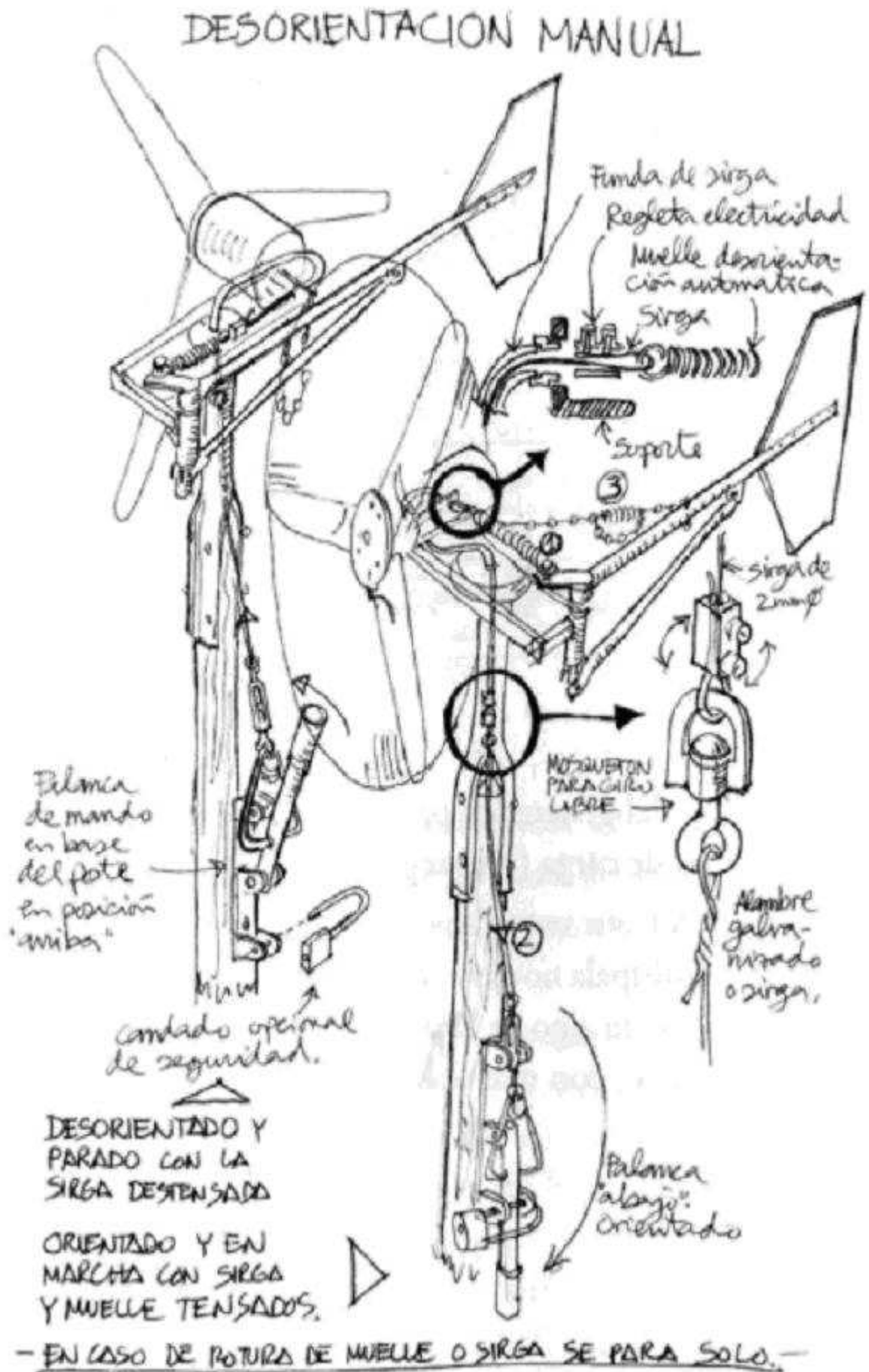


Esta otra fotografía muestra la continuación de la sirga a través del molino vemos como toma una curva para ir en dirección a la veleta.



Esta otra imagen muestra como se conecta la sirga al sistema de frenado manual y sería la continuación de la anterior fotografía.





2.9.5.1 MUELLES.

En este apartado se describe la elección del muelle que utiliza tanto el sistema de desorientación manual como la automática.



Para el cálculo del muelle a colocar se fija primero la velocidad a la que debía desorientarse el sistema, cuyo valor de referencia se tomo de 9 m/s. Con ésta velocidad se calcula la presión del viento:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.25 \cdot (9)^2 = 50.625 N / m$$

Sabiendo la presión del viento y la superficie de la contra veleta se calcula la fuerza:

$$F = P \cdot S = 50.625 \cdot \frac{100}{10000} = 0.5063 N$$

Con esta fuerza y con la ley de Newton se sabe que hay que colocar un peso de unos 60 gramos y con este peso colocado en el muelle se elige aquel que se considere según la elongación que experimente, en este caso se decidió colocar aquel que se alargó un par de centímetros.

Para el montaje del freno se siguió unos pasos diferenciados que a continuación se exponen:

- Mediante el acondicionamiento de un palo de madera se consiguió hacer la palanca situada en la base de la torre, la cual actúa sobre el freno.
- Se unió mediante una sirga de acero de unos 3mm la dicha palanca con el sistema de freno del aerogenerador.
- Se montó, ya arriba del aerogenerador, el sistema de muelle-cadena para poder sacar la veleta de la dirección del viento.

2.11. TORRES.

Se va a comenzar explicando los tipos diferentes de torres para aerogeneradores de gran potencia.

- Torres tubulares de acero.
- Torres de celosía.
- Torres de mástil tensado con vientos.
- Torres híbridas.

2.11.1. TORRES TUBULARES DE ACERO.

La mayoría de los grandes aerogeneradores se entregan con torres tubulares de acero, fabricadas en secciones de 20-30 metros con bridas en cada uno de los extremos, y son unidas con pernos.

Las torres son tronco-cónicas (es decir, con un diámetro creciente hacia la base), con el fin de aumentar su resistencia y al mismo tiempo ahorrar material.



2.11.2. TORRES DE CELOSÍA.

Las torres de celosía son fabricadas utilizando perfiles de acero soldados. La ventaja básica de las torres de celosía es su coste, puesto que una torre de celosía requiere sólo la mitad de material que una torre tubular sin sustentación adicional con la misma rigidez.

Para algunos la principal desventaja de este tipo de torres es su apariencia visual. En cualquier caso, por la razón que sea, las torres de celosía han desaparecido casi por completo en los grandes aerogeneradores modernos.



2.11.3. TORRES DE MÁSTIL TENSADO CON VIENTOS.

Muchos de los aerogeneradores pequeños están contruidos con delgadas torres de mástil sostenidas por cables tensores. La ventaja es el ahorro de peso y, por lo tanto, de coste. Las desventajas son el difícil acceso a las zonas alrededor de la torre, lo que las hace menos apropiadas para zonas agrícolas.

Finalmente, este tipo de torres es más propensa a sufrir actos vandálicos, lo que compromete la seguridad del conjunto.



2.11.4. CONSIDERACIONES REFERENTES A LAS TORRES.

Cuando se habla de torres hay que tener en cuenta varias cosas importantes como pueden ser:

- Consideraciones de coste
- Consideraciones aerodinámicas
- Consideraciones de dinámica estructural
- Elección entre torres altas y bajas
- Consideraciones de seguridad en el trabajo

2.11.5. CONSIDERACIONES DE COSTE.

Generalmente, el precio de la torre de la turbina eólica supone alrededor de un 20 por ciento del coste total de la turbina. Para una torre de unos 50 metros, el coste adicional de otros 10 metros es de unos 15.000 dólares americanos. Por lo tanto, es bastante importante para el coste final de la energía construir las torres de la forma más óptima posible.

2.11.6. CONSIDERACIONES AERODINÁMICAS.

Generalmente, es una ventaja disponer de una torre alta en zonas con una elevada rugosidad del terreno, dado que la velocidad del viento aumenta conforme nos alejamos del suelo.

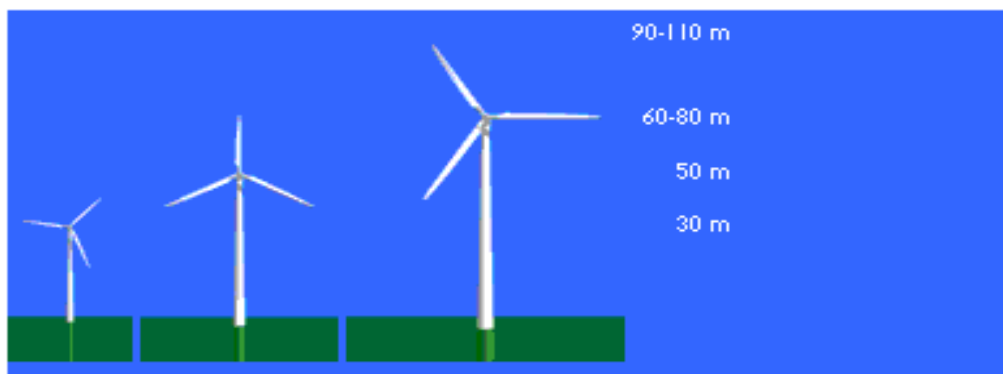
Las torres de celosía y las de mástil tensado con vientos tienen la ventaja de ofrecer menos abrigo que una torre maciza.

2.11.7. CONSIDERACIONES DE DINÁMICA ESTRUCTURAL.

Las palas de rotor de turbinas con torres relativamente cortas estarán sometidas a velocidades de viento muy diferentes (y, por lo tanto, a diferente flexión) cuando la pala se encuentre en su posición más elevada y en su posición más baja, lo que provoca un aumento de las cargas de fatiga en la turbina.

2.11.8. ELECCIÓN ENTRE TORRES ALTAS Y BAJAS.

Obviamente, se obtendrá más energía de una turbina más grande que de otra pequeña, pero lógicamente las torres de aerogeneradores de gran potencia serán de mayor altura que las torres de los aerogeneradores de menor potencia tal y como se observa en el siguiente dibujo.



Claramente, un rotor de por ejemplo de 60 metros de diámetro no podrá ser instalado sobre una torre de menos de 30 metros. Pero si consideramos el coste de un gran rotor y un gran generador y multiplicador, sería seguramente un desperdicio instalarlos sobre una torre pequeña, ya que se dispone de velocidades de viento mucho más altas y, por lo tanto, de mucha más energía con una torre alta.

Cada metro de torre cuesta dinero, por supuesto, por lo que la altura óptima de la torre es función de:

1. Coste por metro de torre (10 metros más de torre le costarán actualmente alrededor de 15.000 dólares americanos).
2. Cuánto varían los vientos locales con la altura sobre el nivel del suelo, es decir, la rugosidad promedio del terreno local, sabiendo tal y como hemos explicado en la introducción que las grandes rugosidades van mejor con una torre alta.
3. El precio que el propietario de la turbina obtiene por un kWh adicional de electricidad.

Los fabricantes suelen servir máquinas donde la altura de la torre es igual al diámetro del rotor. Estéticamente, mucha gente piensa que las turbinas son más agradables a la vista cuando la altura de la torre es aproximadamente igual al diámetro del rotor.

2.12. CONSIDERACIONES EN LA SEGURIDAD EN EL TRABAJO.

Los grandes aerogeneradores modernos suelen utilizar torres tubulares tronco-cónicas de acero. La principal ventaja de esta torre sobre una torre de celosía es que hace que el acceso del personal de servicio, para mantenimiento y reparación, sea mucho más cómodo y seguro. La desventaja fundamental es el coste.

El principal peligro de trabajar con aerogeneradores es la altura sobre el suelo durante los trabajos de instalación y de mantenimiento.

En los nuevos aerogeneradores daneses es obligatorio disponer de dispositivos de protección anticaída, es decir, una persona que suba a la turbina debe llevar un conjunto de correas como un paracaidista.

Las correas están sujetas con un cable de acero a un sistema de anclaje, que sigue a la persona que está subiendo o bajando de la turbina.

El sistema de cables debe incluir un amortiguador, con el fin de que, en el caso de una caída, las personas estén razonablemente seguras.

Una tradición danesa (que después ha sido adoptada por otros fabricantes) es la de construir las escaleras a una cierta distancia de la pared.

Esto permite que el personal de servicio pueda apoyar los hombros en la parte interior de la pared de la torre mientras escala. En esta imagen puede ver a la editora de nuestro sitio web en español comprobando que, en efecto, se trata de una solución muy práctica.

La protección de la maquinaria, contra el fuego y de aislamiento eléctrico, está regulada por diversos estándares nacionales e internacionales.

Durante el funcionamiento es esencial que la maquinaria pueda pararse completamente. Además de con un freno mecánico, el rotor puede fijarse al sitio con una chaveta, para evitar cualquier movimiento de alguna de las partes.

2.13. CARGAS DE FATIGA.

Las aerogeneradores están sujetos a vientos fluctuantes y, por tanto, a fuerzas fluctuantes. Esto se da particularmente en el caso de estar emplazados en un clima eólico muy turbulento.

Los componentes sujetos a una flexión repetida pueden desarrollar grietas, que en última instancia pueden provocar la rotura del componente. Un ejemplo de esto es la enorme máquina alemana Growian (100 m de diámetro de rotor), que tuvo que ponerse fuera de servicio en menos de 3 semanas de funcionamiento.

La fatiga del metal es un problema bien conocido en muchas industrias. Así pues, generalmente el metal no se elige como material para las palas del rotor.

En el diseño de una turbina eólica, es muy importante calcular por anticipado como vibrarán los diferentes componentes, tanto individualmente como en conjunto.

También es importante calcular las fuerzas que participan en cada flexión y estiramiento de un componente.

De esto se ocupa la dinámica estructural, donde los físicos han desarrollado modelos matemáticos de ordenador que analizan el comportamiento de toda la turbina eólica.

Estos modelos son utilizados por los fabricantes de turbinas para diseñar sus máquinas de forma segura.

2.14. EJEMPLO DE DINÁMICA ESTRUCTURAL.

Una torre de aerogenerador de 50 m de alta tendrá tendencia a oscilar de un lado a otro cada 3 segundos, aproximadamente. La frecuencia a la que la torre oscila de un lado al otro se denomina frecuencia propia de la torre.

La frecuencia propia depende de la altura de la torre, el espesor de la pared de la torre, el tipo de acero y del peso de la góndola y el rotor. Ahora bien, cada vez que la pala del rotor pasa por el abrigo de la torre, el rotor se verá un poco menos empujado contra la torre.

Si el rotor gira con una velocidad de rotación tal que una pala pasa la torre cada vez que la torre está en una de sus posiciones extremas, entonces la pala del rotor puede bien amortiguar o amplificar (reforzar) las oscilaciones de la torre.

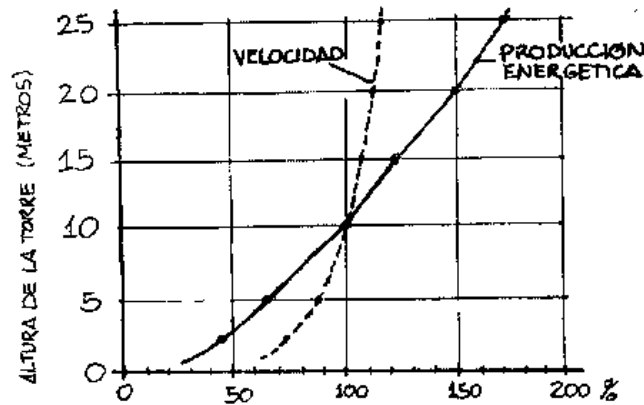
Las propias palas del rotor son también flexibles y pueden tener tendencia a vibrar, digamos, una vez por segundo. Como puede ver, es muy importante conocer las frecuencias propias de todos los componentes para diseñar una turbina segura, que no oscile fuera de control.

Un ejemplo muy espectacular de las fuerzas de dinámica estructural trabajando bajo la influencia del viento (oscilaciones de torsión subamortiguadas) es el famoso derrumbamiento de puente de Tacoma (cerca de Seattle, en los Estados Unidos), en el que unos militares que estaban pasando por él al mismo paso justamente a la frecuencia de resonancia del puente.

2.15. TORRE REFERENTE A ESTE PROYECTO.

2.15.1. INTRODUCCIÓN.

En las instalaciones eólicas, la torre juega un papel decisivo, ya que de su altura y emplazamiento, dependerá la producción del molino. Se adjunta un dibujo en el que se explica la variación de la velocidad y de la energía del viento en función de la altura de la torre en un terreno de rugosidad media.



La torre debe salvar todos los obstáculos de alrededor con holgura para que el molino reciba viento de velocidad y dirección constante. La altura más recomendable suele ser 10-15 metros, y en ningún caso se debe bajar de 7 metros.

Por supuesto, la torre debe soportar todo el empuje del viento sobre el molino sin flaquear.

En aerogeneradores a pequeña escala se diferencian dos tipos fundamentales de torre:

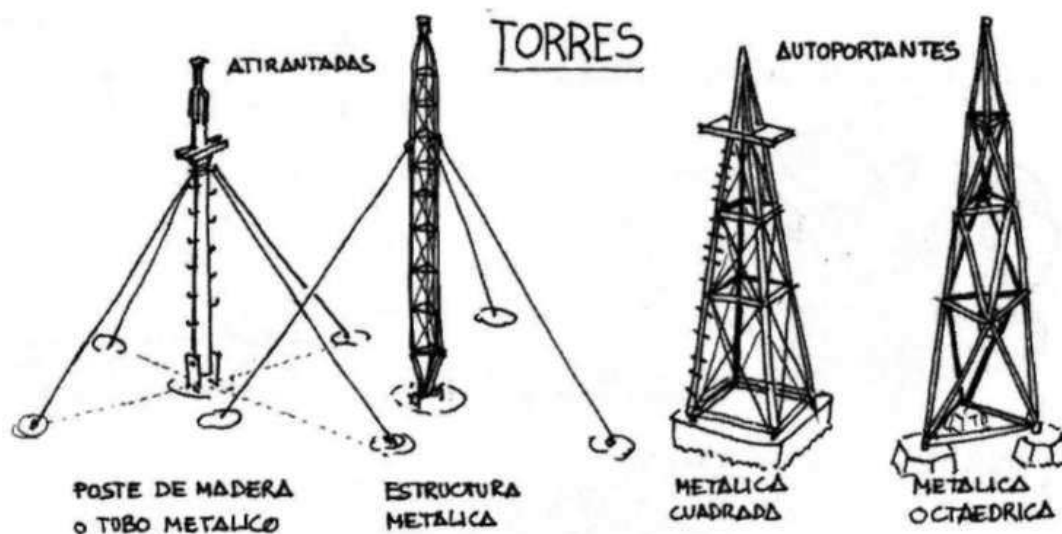
- Las atirantadas
- Las autoportantes.
- Postes telegráficos

2.15.1.1 Atirantadas.

Éste tipo de torres se caracterizan por ser las más baratas y fáciles de instalar, y por lo tanto las más extendidas para pequeños molinos.

2.15.1.2 Autoportantes.

Ésta clase de torres son más caras y sólo se deben emplear cuando no tengamos otro remedio y no podamos poner tensores.



En el dibujo se observa los tipos de torres fundamentales para pequeños aerogeneradores.

Se puede ver que dentro de las atirantadas están las de poste de madera y las de estructura metálica o celosía.

Dentro de las torres autoportantes están las metálicas de base cuadrada y las de base octaédrica.

2.15.1.3 Postes Telegráficos.

Es el tipo de poste más barato y sencillo. Sirve para molinos de hasta 4 m de diámetro de rotor con postes de 15-20 cm de diámetro de grosor. Pueden conseguirse de muchas alturas desde 5 a 12 metros.

La fijación al suelo se hace de forma que el poste no esté en contacto con la tierra pues se pudriría, puesto que es de madera. El anclaje del suelo debe servir como «bisagra» para cuando lo pongamos en pie ya que la forma de ponerlo en pie será a través de una pivotación.

Los cables tensores pueden ser de sirga acerada galvanizada, o bien alambre galvanizado. Se deben instalar de modo que la inclinación respecto del suelo sea de 45° o menos, para que trabajen lo más horizontalmente, éstos cables son importantes ya que serán ellos los encargados de mantener el poste bien recto.

Otra cosa importante a tener en cuenta es que deben resistir todo tipo de vientos que se den en la zona de colocación del aerogenerador.

Una cosa importante a tener en cuenta sobre estos cables es que nunca se deberá poner cables de menos de 5 mm de diámetro.

En la tabla en la que se ve una persona subida al poste se puede apreciar la tabla en la que se detallan las secciones de los cables y el volumen de hormigón por cable.

Las mejores opciones por las que se puede optar son las de poner tres o cuatro cables. Lo idóneo es colocar cuatro cables, para facilitar la maniobra de subir el poste, con la máxima seguridad y también para que las fuerzas que ejercerá el viento sobre el poste sean lo más simétricas posible.

Los cables se sujetan al poste agarrándolos a la máxima altura posible, siempre que no interfieran con la hélice logrando así una mejor sujeción el inconveniente de esto es que cuanto más alto se pongan los cables más lejos de la base se colocaran los cables amarrados al hormigón ocupando así un mayor espacio de terreno.

Para ir haciendo el mantenimiento del aerogenerador lógicamente habrá que subirse hasta por lo menos la altura del aerogenerador.

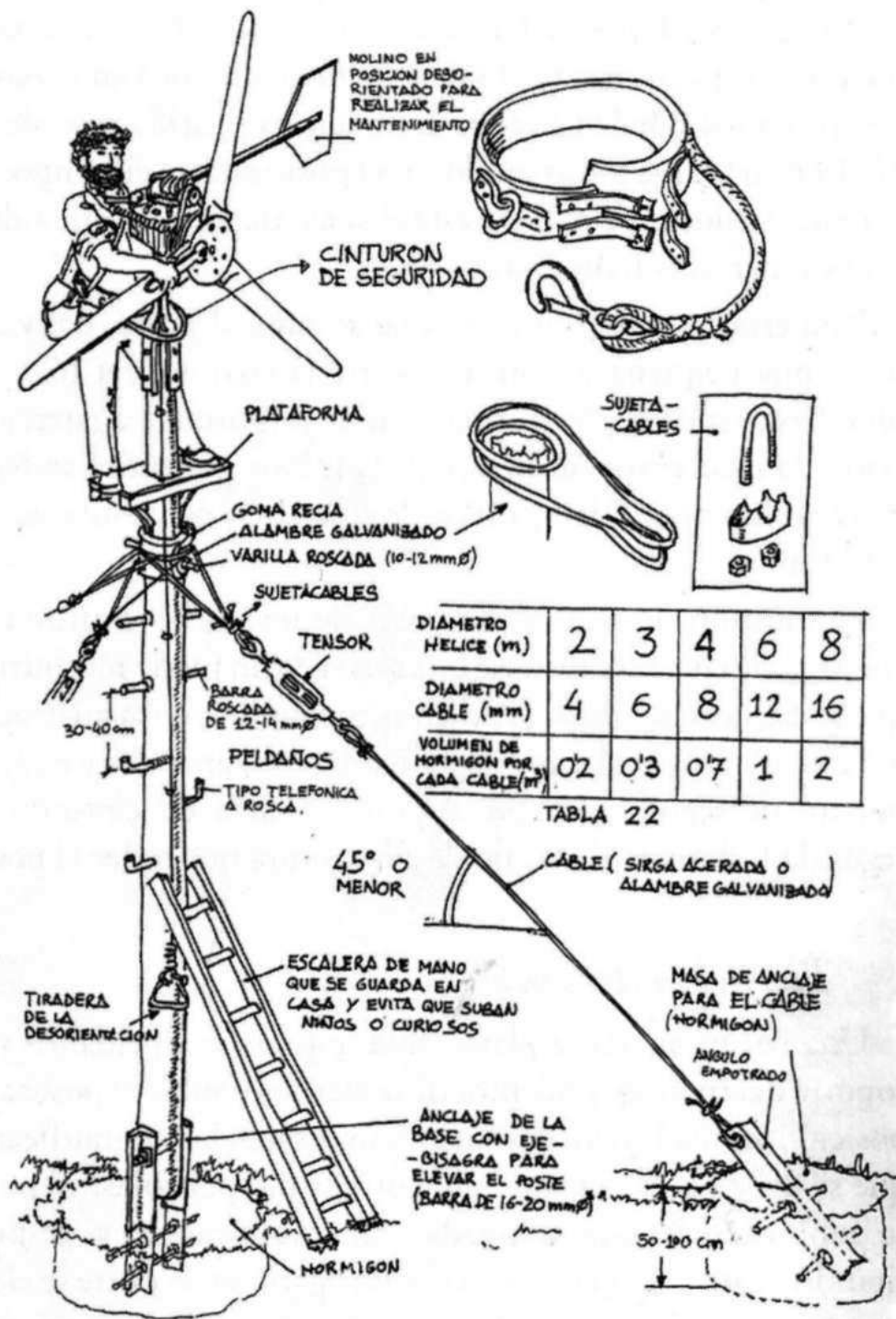
Una idea con la que se puede trabajar para subir al poste es la de colocar peldaños eso sí siempre que el poste sea de madera y se pueda perforar con algún taladro.

Un concepto a tener en cuenta es que si el aparato va a estar colocado en algún lugar de fácil acceso para cualquier persona es conveniente idear algún sistema para que únicamente se pueda subir el dueño del mismo.

Alguna idea puede ser la de colocar una escalera corredera hacia arriba que la podamos subir hacia el poste una vez que no vayamos a subir. Y para bajarla sería conveniente la colocación de un candado.

Para estar cómodo una vez que se sube al poste, conviene tener una pequeña plataforma sobre la cual apoyar bien los pies. Ésta plataforma en nuestro caso será de madera mediante tablas, de un grosor importante, colocadas de manera que formen un suelo.

Por seguridad una vez que nos encontremos en la plataforma, es muy importante agarrarse al poste con un cinturón de seguridad o con algún tipo de arnés que nos permita trabajar con comodidad y confianza en esas alturas.



2.15.2. ELEVACIÓN DEL POSTE.

Una vez que se ha fabricado la plataforma, la torre, la base de la torre (poniendo una especie de estrella para que tenga una mayor adherencia en el hormigón) se puede proceder a la elevación de la torre.

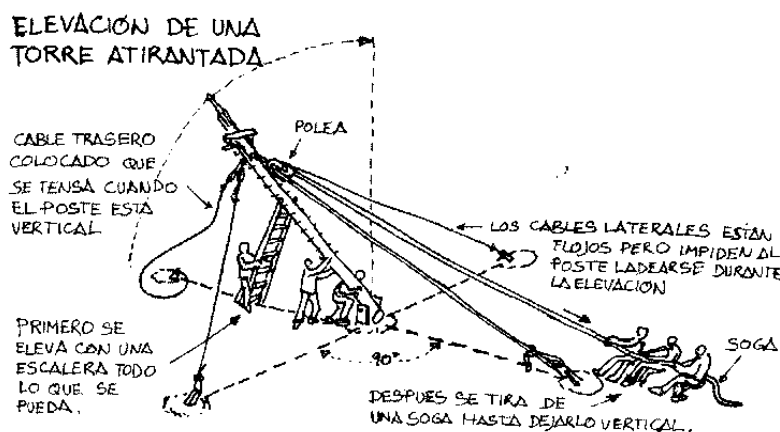
Es una parte del trabajo en la que hay que aplicar fuerza y algún sistema de polipasto. Los pasos que se llevaron a cabo en la elevación fueron los siguientes:

- Realización de la base de la torre de forma octaédrica para que una vez que esté colocada verticalmente tenga más agarre con el terreno en el caso que sople viento fuerte.



- Lograr excavar un agujero en el terreno mediante pico y pala hasta que por lo menos logremos meter la base octaédrica y un poco del propio poste para ampliar así la resistencia de la propia torre.
- En el momento en que tenemos la torre tumbada en el suelo para disponernos a la elevación es imprescindible la colocación de una bisagra, como las que se usan en las puertas. Ésta bisagra irá colocada tanto en la base de la torre como en el agujero de la base de la misma.
- Cuando hemos logrado colocar la bisagra completa tanto a la torre como al agujero se procederá a la elevación de la misma.
- Para que nos sea más fácil la colocación en vertical de la torre se amarrará la misma con un polipasto para ayudar a la elevación.
- Cuando se ha logrado colocar perfectamente vertical la torre mediante la ayuda de la pivotación y de mucha gente se procede a llenar de hormigón el agujero para que tenga una sujeción fuerte y firme.

Se adjunta un dibujo hecho a mano en el que se puede apreciar gráficamente el proceso descrito anteriormente.



2.16. EMPLAZAMIENTO DE LA TORRE.

Tal y como se ha explicado en los apartados anteriores, para conseguir que el aerogenerador aproveche el 100% de la energía del viento es imprescindible conseguir un sitio idóneo en lugar donde se vaya a colocar.

Aquí se adjunta un dibujo explicativo en el que se observa los diferentes lugares donde se puede aprovechar mejor o peor la energía del viento.



2.16.1. OTRAS UBICACIONES.

En el caso que sea y por la razón que sea no se puede colocar la torre en suelo firme y se debe colocar en la vivienda habrá que tener varias consideraciones.

El poste que sujete a todo el aparato deberá sujetarse a la pared de modo que no transmita vibraciones molestas ni ruidos, para solucionar esto bastará con poner unas gomas o algo que permita absorber las vibraciones entre el poste y la sujeción del poste y la pared tal y como se puede poner en la fotografía.



Otra ubicación posible es el de ponerlo encima del tejado. Ésta ubicación sólo será permitida para aerogeneradores de pequeña potencia ya que el tejado no puede ofrecer gran resistencia a la colocación de grandes torres.

2.17. OBTENCIÓN DE LA TORRE DEL PROYECTO.

La torre que se consiguió, es de celosía de unos 6 metros de altura. Hay que decir que no se ha hecho en éste proyecto ya que sino se habría complicado muchísimo, ya que la fabricación de éstas torres requieren de mucha herramienta alguna que otra cara, de dominio con la misma, de un taller o similar para realizarla y más complicaciones.

Por lo tanto ésta se consiguió por fortuna casi gratuitamente. La única modificación que se tuvo que hacer fue la de colocar varias cosas:

- Se tuvo que soldar en la base la bisagra con la que se ha explicado anteriormente la elevación de la torre: mediante pivotación.

- Se colocó un tubo bastante robusto, mediante soldadura en el que posteriormente se iba a colocar la estructura con la que pivota el aerogenerador entero
- Se acopló mediante un soporte hecho a la propia torre la plataforma de madera en la que una vez puesta la torre en vertical sirve para estar de pie en los momentos de mantenimiento.
- Se instaló un tubo de plástico, por el interior de la torre de celosía, por el que se colocó la sirga de acero que permite poner en funcionamiento el accionamiento de frenado manual desde abajo, tal y como se explica anteriormente en el apartado de frenado manual. Es importante recalcar que la sirga de acero encargada de accionar el freno está colocada por el interior del tubo de plástico para protegerla por posibles deterioros.
- En la parte de debajo de la torre a la altura de 180 centímetros se instaló una caja en la que está la palanca encargada de accionar el freno manual. Ésta caja está protegida mediante un candado.

2.17.1. ESTRUCTURA DE GENERADOR.

Lógicamente esta estructura tiene que ser lo más robusta posible ya que es la que sujeta el peso de prácticamente todo el aerogenerador (palas generador veleta...) su construcción fue la siguiente:

Se obtuvo 4 barras de sección hueca y cuadrada de unos 10 cm de lado y casi 1 cm de grosor.

Una vez que se cortaron a la medida adecuada con la radial (maquina-herramienta mediante un disco que gira a alta velocidad que sirve para cortar diversos tipos de materiales) se colocaron estos cuatro tubos formando un cuadrado entre sí, se realizó la unión mediante soldadura eléctrica.

Cuando se hubo pintado se procedió a el anclaje del generador a la estructura, también se colocó toda el sistema de la veleta en la propia estructura.

CAPÍTULO

3

Generador

- 3.1. CONCEPTOS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR
- 3.2. FUNDAMENTOS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS
- 3.3. IMANES
- 3.4. CURVAS DE MAGNETIZACIÓN DE IMANES
- 3.5. CIRCUITOS MAGNÉTICOS.
- 3.6. CALCULO IMANES
- 3.7. CONVERSION DEL MOTOR A GENERADOR.
- 3.8. TORNEADO DEL ROTOR
- 3.9. PROCESO DE CREACIÓN
- 3.10. CÁLCULOS TEÓRICOS EN VACÍO
- 3.11. CÁLCULOS TEÓRICOS EN CARGA.
- 3.12. ANÁLISIS DE JMAG EN VACÍO
- 3.13. JMAG EN CARGA
- 3.14. ENSAYOS PRÁCTICOS
- 3.15. COMPARACION TEORIA, JMAG Y REALIDAD

3.1. CONCEPTOS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN GENERADOR.

3.1.1. INTRODUCCIÓN.

Antes de explicar todas las fuerzas y fenómenos que suceden en un generador eléctrico se va proceder a explicar los diferentes tipos de generadores que existen.

Para empezar se deberá saber que hay fundamentalmente dos tipos de máquinas, las máquinas síncronas y las asíncronas.

Las asíncronas son aquellas que tienen que girar a una velocidad diferente a la de sincronismo para generar par resistente y en consecuencia electricidad. Aquí entra el concepto importante en este tipo de máquinas, el deslizamiento.

El deslizamiento de una máquina de inducción se define como la velocidad relativa entre el campo magnético producido por las corrientes inyectadas en el estator y la velocidad mecánica del rotor.

Aunque se puede utilizar una máquina de inducción como motor o como generador tiene muchas desventajas como generador y por tanto pocas veces se utiliza como tal. Por esta razón, las máquinas de inducción se refieren a los motores de inducción.

La única diferencia entre una máquina de inducción y una máquina síncrona está en el rotor.

Hay dos tipos de rotores. Uno de ellos es el denominado de jaula de ardilla, y otro es el llamado rotor bobinado:

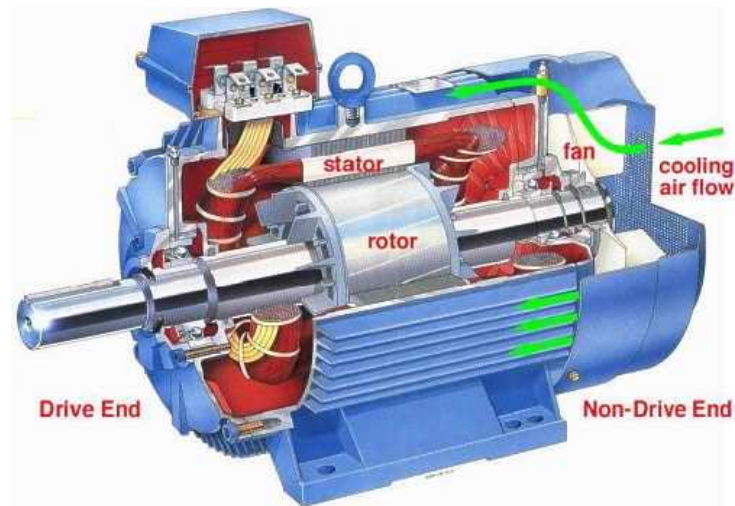
El rotor de jaula de ardilla constituido por una serie de conductores metálicos (normalmente de aluminio) dispuestos paralelamente unos a otros, y cortocircuitados en sus extremos por unos anillos metálicos, esto es lo que forma la llamada jaula de ardilla por su similitud gráfica con una jaula de ardilla.

Esta 'jaula' se rellena de material, normalmente chapa apilada. De esta manera, se consigue un sistema n-fásico de conductores (siendo n el número de conductores) situado en el interior del campo magnético giratorio creado por el estator. Con lo cual se tiene un sistema físico muy eficaz, simple, y muy robusto y sobre todo barato (básicamente, no requiere mantenimiento)

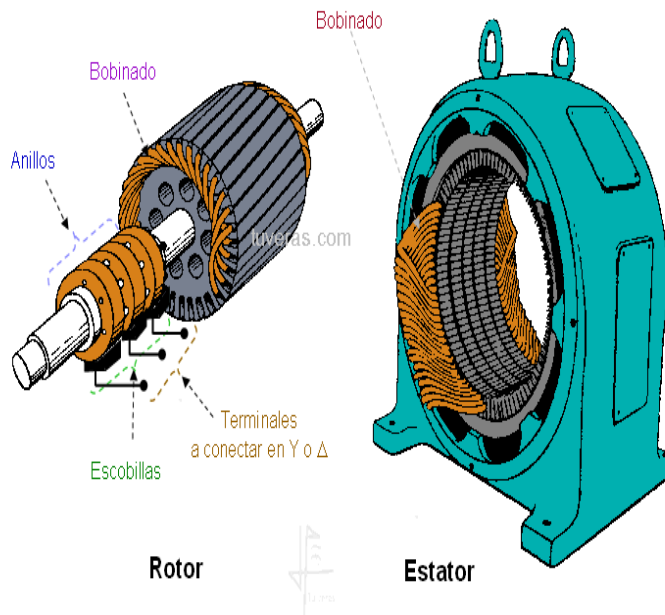
Pero con el inconveniente de que no se puede variar la intensidad del campo magnético del rotor.

El otro tipo es el rotor bobinado. Este tiene un rotor constituido, en vez de por una jaula, por una serie de conductores bobinados sobre él en una serie de ranuras situadas sobre su superficie. De esta forma se tiene un bobinado en el interior del campo magnético del estator, del mismo número de polos (ha de ser construido con mucho cuidado), y en movimiento. Este rotor es mucho más complicado de fabricar y mantener que el de jaula de ardilla, pero permite el acceso al mismo desde el exterior a través de unos anillos que son los que cortocircuitan los bobinados. Esto tiene ventajas, como la posibilidad de utilizar un reostato de arranque que permite modificar la velocidad y el par de arranque, así como el reducir la corriente de arranque. Pero con el principal inconveniente del costo de la bobina del rotor y fabricación.

En cualquiera de los dos casos, el campo magnético giratorio producido por las bobinas inductoras del estator genera unas corrientes inducidas en el rotor, que son las que producen el movimiento.



Rotor de jaula de ardilla.



Rotor bobinado

Las máquinas síncronas, que son las que se van a utilizar, y se definen de manera que la velocidad de giro en régimen permanente está ligada con la frecuencia de la tensión en bornes y el número de pares de polos.

$$n = \frac{60 \cdot f}{P} = \frac{120 \cdot f}{p}$$

Dónde:

f: Frecuencia de la red a la que está conectada la máquina.

P: Número de pares de polos que tiene la máquina.

p: Número de polos que tiene la máquina.

n: Velocidad de sincronismo de la máquina.

Según esta fórmula se puede averiguar las diferentes velocidades de sincronismo sabiendo que la frecuencia de la red eléctrica en Europa es 50 Hz.

Para una máquina con:

p=1	n=3000 rpm
p=2	n=1500 rpm
p=3	n=1000 rpm

Las máquinas síncronas se utilizan en mayor medida como generadores de corriente alterna que como motores de corriente alterna, ya que no presentan par de arranque y hay que emplear diferentes métodos de arranque y aceleración hasta la velocidad de sincronismo.

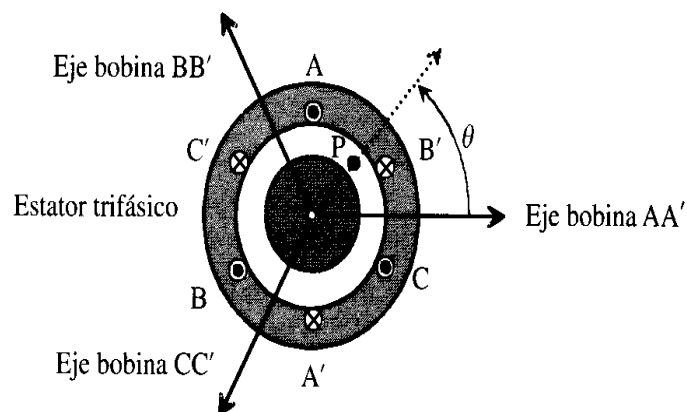
También se utilizan para controlar la potencia reactiva de la red por su capacidad para, manteniendo la potencia activa desarrollada constante, variar la potencia reactiva que absorbe o cede a la red.

Según se ha dicho antes lo único en que se diferencia la máquina síncrona de la asíncrona es en el rotor. Las máquinas síncronas se clasifican por tener los polos salientes o los polos lisos.

La utilización de uno u otro depende de las velocidades a las que se trabaja. Generalmente, las máquinas de bajo número de polos, que tienen alta velocidad, suelen ser de polos lisos. Para las máquinas de polos salientes ocurre lo contrario ya que hay más número de pares de polos con la consecuencia que la velocidad es menor

3.1.2. FUERZAS MAGNÉTICAS.

Imaginemos que se tiene un sistema formado por tres devanados desfasados entre si 120° eléctricos tal y como podemos ver en el dibujo siguiente:



En este dibujo se ve que hay señaladas tres grupos de bobinas, cuyos principios son A, B, C y sus finales son A', B', C'.

Se hace circular por cada una de las bobinas 3 corrientes trifásicas equilibradas como son:

$$i_a = I_m \cos \omega t \quad ; \quad i_b = I_m \cos (\omega t - 120^\circ) \quad ; \quad i_c = I_m \cos (\omega t + 120^\circ)$$

Cada devanado producirá una fuerza magnetomotriz orientada en su eje respectivo. Es importante saber que estos devanados al llevar estas corrientes desfasadas y que las bobinas también están desfasadas 120° en el espacio, en

consecuencia la fuerza magnetomotriz resultante en un punto cualquiera de la maquina será la suma de las 3 ondas anteriores:

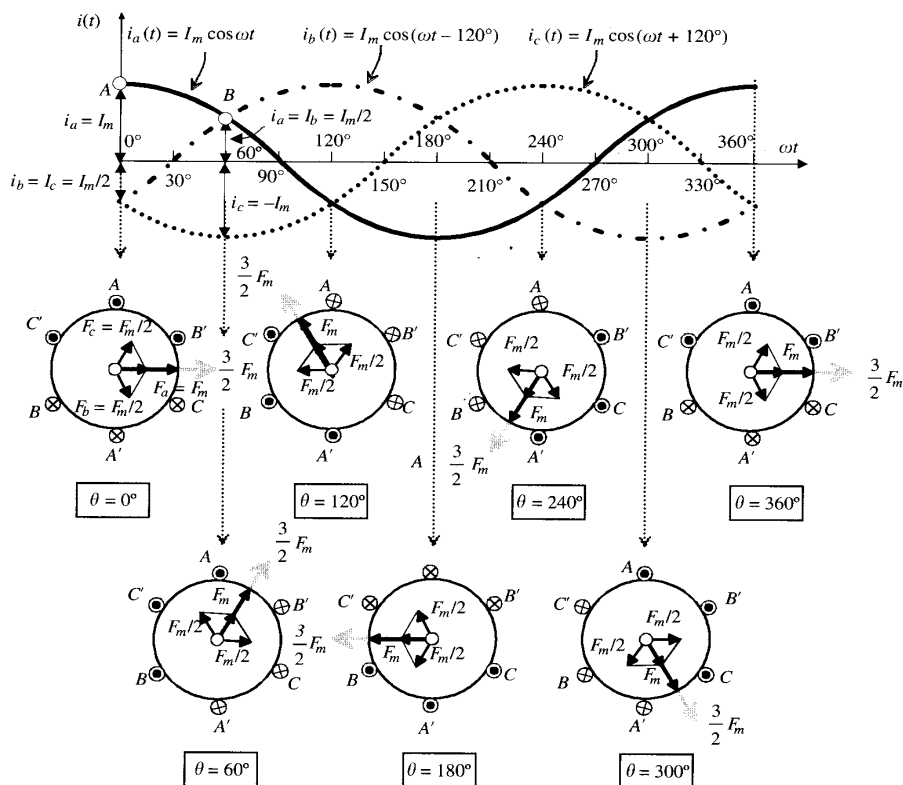
$$\mathcal{F}(\theta, t) = \mathcal{F}_a + \mathcal{F}_b + \mathcal{F}_c$$

$$\mathcal{F}(\theta, t) = F_m [\cos \omega t \cos \theta + \cos (\omega t - 120^\circ) \cos (\theta - 120^\circ) + \cos (\omega t + 120^\circ) \cos (\theta + 120^\circ)]$$

Haciendo cálculos matemáticos y simplificando llegamos a la conclusión de que la fuerza magnetomotriz resultante en el entrehierro es:

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos (\omega t - \theta) = \frac{3}{2} F_m \cos (\omega t - p\alpha)$$

Para comprender mejor esta ecuación resultante se va a adjuntar un dibujo en el que se puede ver la evolución en el tiempo de las 3 corrientes. También se puede ver en cada momento gracias a la posición de las 3 corrientes la fuerza magnetomotriz resultante de las 3 corrientes desfasadas 120° .



En este dibujo algo importante que se puede ver que el valor máximo de la fuerza magnetomotriz resultante coincide con el eje del devanado que está llevando en ese momento la corriente de pico. Entonces se dice que se ha

producido un campo magnético giratorio que presenta 2 características: gira a una velocidad constante y tiene una amplitud constante.

Entonces la posibilidad de producir un campo magnético giratorio a partir de 3 corrientes desfasadas 120° se denomina teorema de Ferraris.

Según lo explicado de cómo se crean los campos magnéticos en el estator (por las 3 corrientes desfasadas 120°) y sabiendo las diferentes formas que existen de generar campo magnético en el rotor (con imanes permanentes en nuestro caso), se puede decir que si dos campos magnéticos están presentes en una máquina se creará un par que tiende a alinearlos.

Si un campo magnético es producido por el estator de una máquina AC y el otro es producido por el rotor, el par inducido en el rotor obligará a que este gire para alinear los dos campos.

Si existe alguna forma de lograr que el campo magnético del estator rote efectuara una ‘persecución’ circular constante del campo magnético del estator debido al par inducido en el rotor, esto explicado es el funcionamiento básico de todo motor AC.

3.1.3. PERDIDAS EN MAQUINAS ELECTRICAS.

Se va a hacer un balance de potencias poniéndose en el caso de un motor sabiendo que para el caso de un generador es parecido.

Cuando el motor está en funcionamiento, el estator se alimenta de la red y absorbe una potencia:

$$P_1 = m_1 V_1 I_1 \cos \varphi_1$$

Parte de la P_1 se consume (disipa) en la resistencia R de los devanados del estator, transformándose en calor por el efecto Joule. La otra parte de la potencia se pierde en hierro.

$$P_{Fe1}$$

La suma de ambas potencias de pérdidas representa la disipación total en el estator:

$$P_{p1} = P_{cu1} + P_{Fe1}$$

Se puede considerar que el único elemento que produce pérdidas en el estator es el hierro. La potencia electromagnética que llegara al rotor a través del entrehierro y que se denominará potencia en el entrehierro P_a tendrá una magnitud:

$$P_a = P_1 - P_{p1} = P_1 - P_{cu1} - P_{Fe}$$

En el rotor aparecen unas perdidas adicionales debidas al efecto Joule y de valor:

$$P_{cu2} = m_2 R_2 I_2^2 = m_1 R_2' I_2'^2$$

Las pérdidas en el hierro del rotor son despreciables debido al pequeño valor de la frecuencia al que estará funcionando la máquina esta potencia que es la denominada potencia mecánica interna será:

$$P_{mi} = P_a - P_{cu2}$$

Teniendo en cuenta el significado de la resistencia de carga R_c del circuito equivalente se podrá poner:

$$P_{mi} = m_1 R_2' \left(\frac{1}{s} - 1 \right) I_2'^2$$

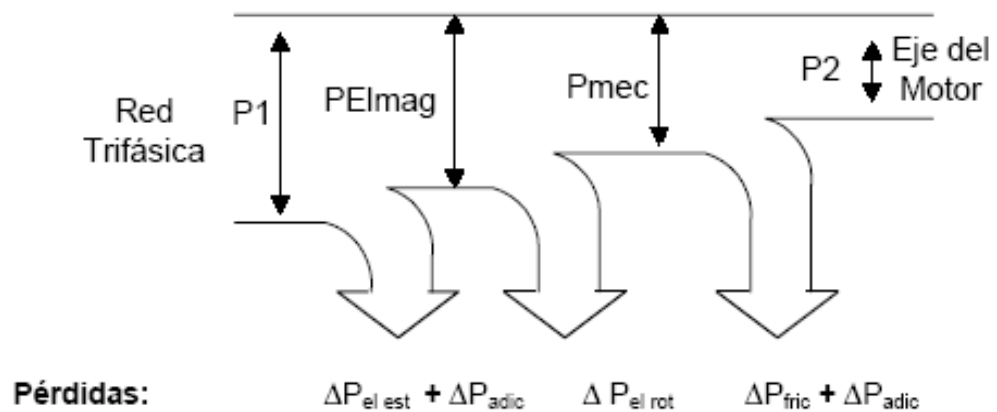
Entonces la potencia útil en el eje será algo menor debido a las pérdidas mecánicas por rozamiento y ventilación, denominando P_m a estas pérdidas y P_u a la potencia útil, resultará entonces:

$$P_u = P_{mi} - P_m$$

El rendimiento de una máquina eléctrica es bastante elevado en el mundo de los elementos rotatorios se encuentra en torno al 80%, éste rendimiento se podrá calcular con la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} = \frac{P_u}{P_u + P_m + P_{cu2} + P_{Fe} + P_{cu1}}$$

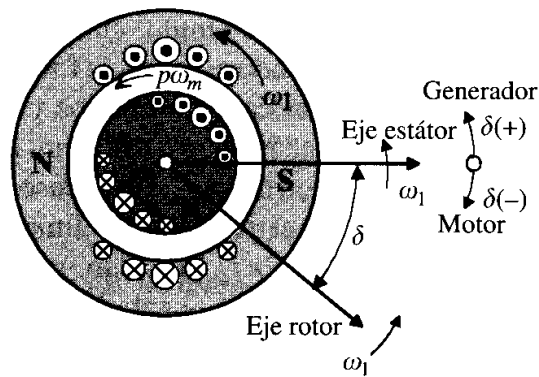
Aquí se presenta un esquema bastante aclarativo de todo este balance de potencias que se ha puesto viendo las potencias de entrada de salida, mecánicas y electromagnéticas:



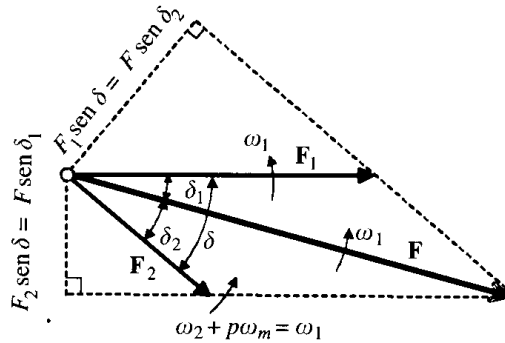
3.1.4 PAR ELECTROMAGENTICO.

Al hilo de lo anterior se va a explicar un poco el concepto de par electromagnético:

Se empezara considerando que la maquina tendrá una simetría cilíndrica. Tal y como se puede ver en el siguiente dibujo:



En la siguiente figura se pueden observar también los favores espaciales correspondientes, que giran a la misma velocidad angular eléctrica y están desfasados entre sí un ángulo que se denomina ángulo de par o ángulo de potencia.



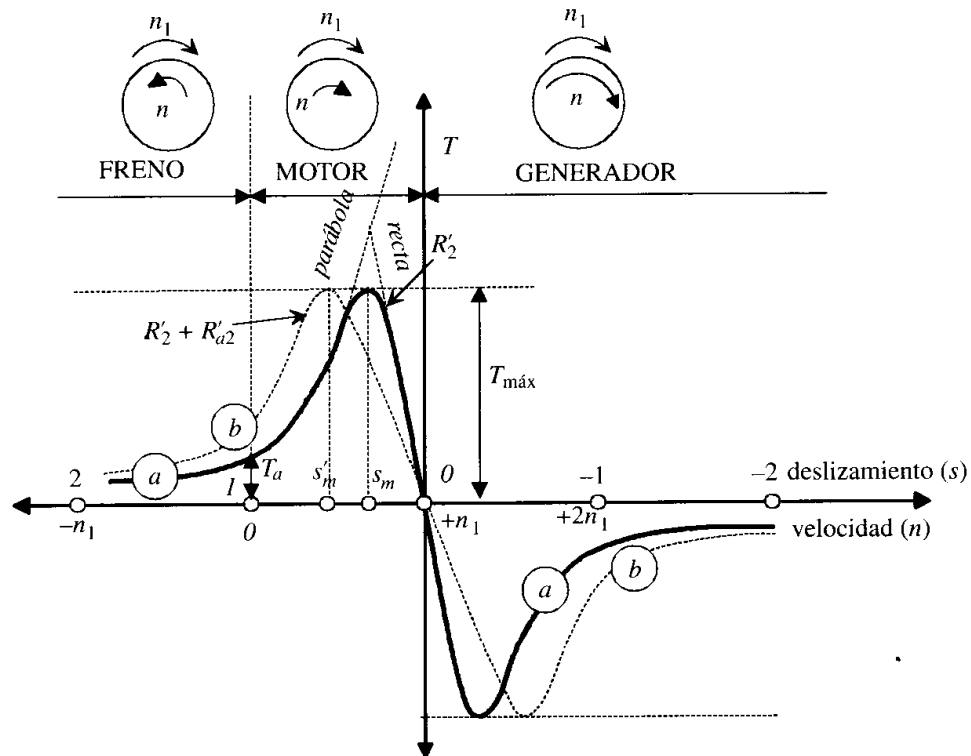
En par electromagnético que aparece entre el estator y el rotor es consecuencia de la acción que tiene lugar entre ambas ondas de fmm para intentar alinear sus ejes. La relación entre F_1 , F_2 y F se obtiene de la diagonal del paralelogramo y es:

$$F^2 = F_1^2 + F_2^2 + 2 F_1 F_2 \cos \delta$$

El par electromagnético es proporcional al flujo existente en la máquina y es consecuencia de la fmm resultante y es producida por ambos devanados.

$$T = -\frac{\pi}{2} p^2 \Phi F_1 \sin \delta_1 = \frac{\pi}{2} p^2 \Phi F_2 \sin \delta_2$$

Aunque el siguiente esquema que se va a poner es de una máquina asíncrona, en él se puede ver que en función de el par requerido en cada momento la máquina se comportará como motor, generador o incluso se frenará.



3.2. FUNDAMENTOS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS:

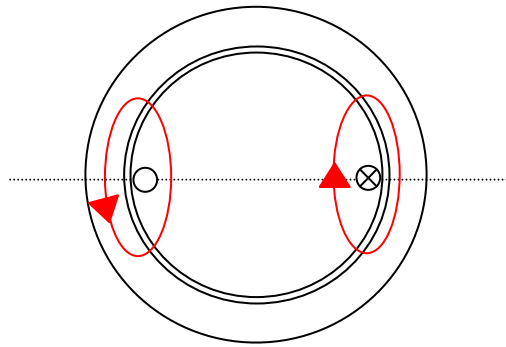
En el siguiente apartado se han definido los aspectos teóricos referentes a las máquinas eléctricas rotativas que se utilizarán en el estudio teórico de la máquina objeto de estudio.

Todos los aspectos se definen y se calculan en base a una máquina ideal simplificada con las siguientes características:

- Simetría cilíndrica perfecta (entrehierro constante).
- Espesor del entrehierro muy pequeño en comparación con los diámetros exterior del rotor e interior del estator, que por lo tanto se tomarán iguales.
- Material magnético ideal en los circuitos magnéticos de rotor y estator., es decir se considerará la permeabilidad infinita, no habrá saturación de los materiales ni tampoco pérdidas en ellos.
- Los conductores serán puntuales, sin dimensiones transversales.
-

3.2.1 DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO EN EL ENTREHIERRO:

Según la ley de Ampere, si se hace circular una corriente por una bobina de paso diametral, se creará un campo magnético alrededor de esta cuya dirección se obtiene con la regla de la mano derecha.



Para analizar la distribución del campo magnético a lo largo del entrehierro se aplica la ley de Ampere escogiendo una trayectoria que atraviese el entrehierro de forma perpendicular.

$$\oint H \cdot dl = \oint \frac{B}{\mu} \cdot dl = N \cdot I$$

Teniendo en cuenta que las líneas de flujo atraviesan por el camino de menor reluctancia y que $\mu_{\text{acero}} \gg \mu_{\text{aire}}$ y $H_{\text{acero}} = 0$ entonces:

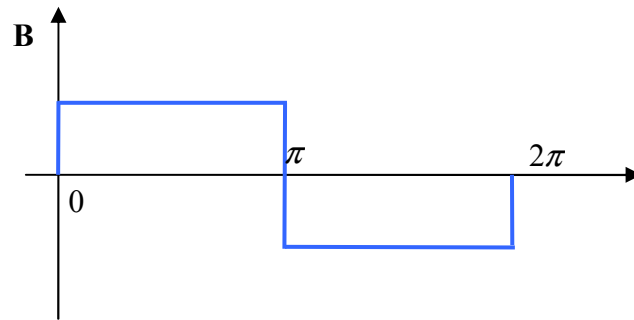
$$2 \cdot H \cdot g = N \cdot I$$

$$H = \frac{N \cdot I}{2g}$$

Por lo tanto a partir de la intensidad de campo, la inducción magnética B en el entrehierro es:

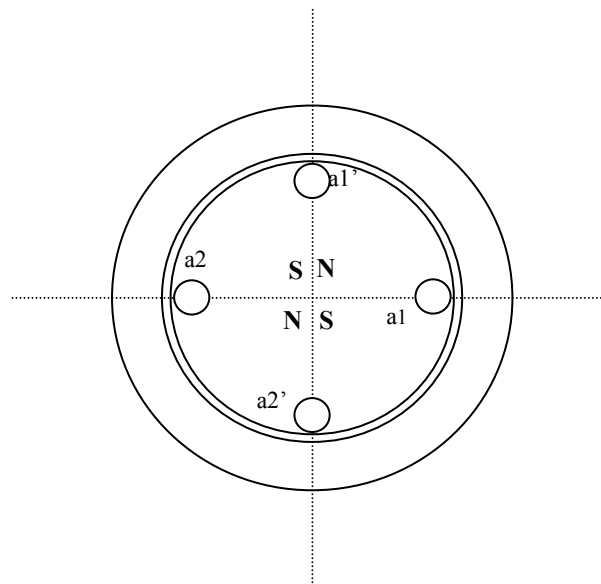
$$B = \mu_0 \cdot H = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2g}$$

La forma de onda que representa la distribución del campo magnético es:



3.2.2. MÁQUINAS MULTIPOLARES:

La máquina anteriormente citada, se trataba de una máquina que solo tenía un par de polos, sin embargo, en una máquina eléctrica convencional lo habitual es que tenga más de dos pares de polos. En el caso de este proyecto la máquina tiene 2 pares de polos.



En este tipo de máquinas la distribución del campo magnético en el entrehierro se obtiene de forma análoga al caso anterior, con la diferencia de que ahora cada 90° mecánicos cambia la polaridad del campo. Se obtiene una onda cuadrada pero de frecuencia doble, es decir, a un periodo completo en el sentido

geométrico, le corresponden dos periodos completos en el sentido electromagnético: dos alternancias completas de norte y sur.

Se establecen por tanto dos sistemas de referencia, eléctrico y mecánico relacionados por el número de pares de polos.

Se obtienen las siguientes relaciones entre variables:

Relación entre ángulos:

$$\theta_e = \theta_m \cdot p$$

Relación entre velocidades:

$$\omega = p \cdot \Omega$$

Relación entre frecuencias:

$$F_e = p \cdot F_m$$

Por tanto los valores de la densidad de flujo magnético y de la tensión inducida respectivamente:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot \frac{N}{p} \cdot I}{2g}$$

$$e_{AA'} = \frac{d\psi_s}{dt} = \frac{N}{p} \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

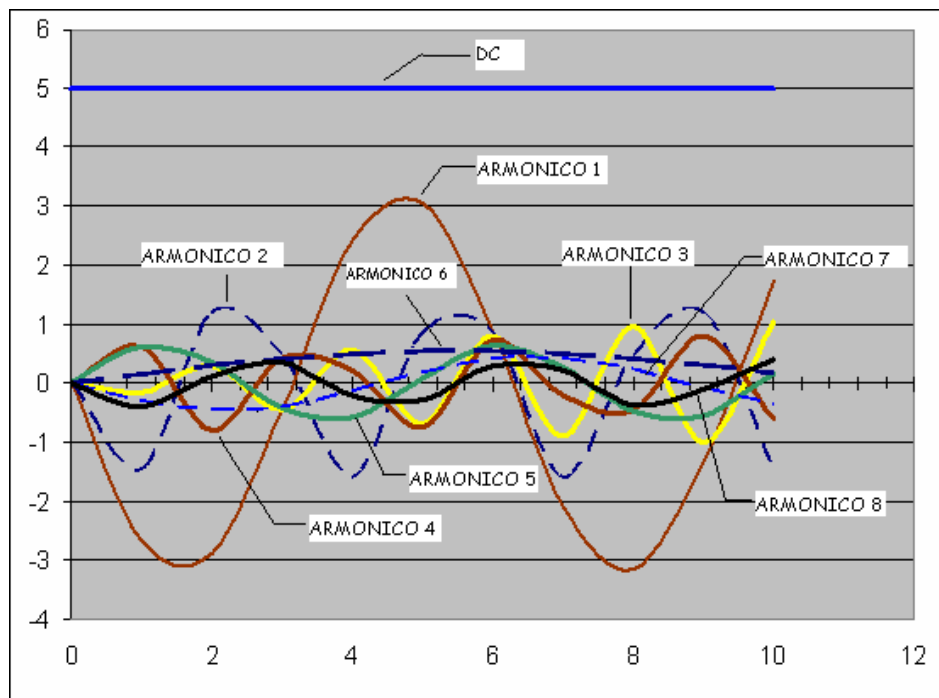
Donde N, es el número total de espiras para toda la máquina.

La mayor diferencia respecto de una máquina de un solo par de polos, es que la frecuencia de la tensión pasa a ser p veces superior.

3.2.3. ATENUACIÓN DE ARMÓNICOS:

Tanto la distribución del campo magnético a lo largo del entrehierro como la tensión inducida en una bobina de paso diametral adquieren forma de onda cuadrada. Sin embargo, en la mayoría de las máquinas eléctricas rotativas la única componente deseada es la fundamental ya que cuando esta trabaja como generador, por ejemplo, se desea obtener una tensión senoidal y cuando se trabaja como motor una corriente senoidal.

Para obtener tanto tensiones inducidas como distribuciones de campo magnético a lo largo del entrehierro con formas más cercanas a la senoidal se utilizan diversas técnicas constructivas, que a su vez consiguen un mejor aprovechamiento de la superficie del entrehierro.



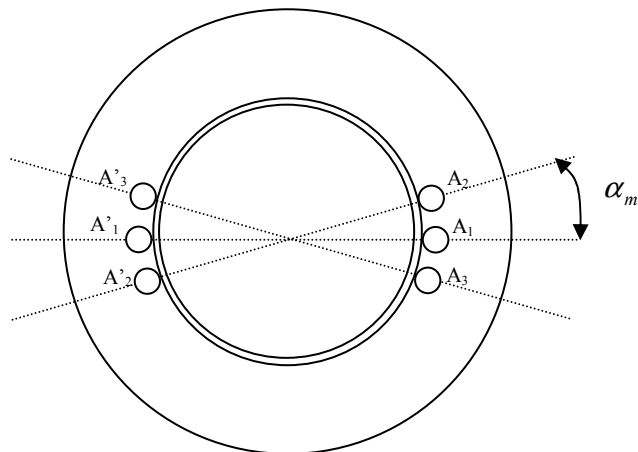
A continuación se definen las técnicas principales para la eliminación de armónicos, que son las siguientes:

- Devanado Distribuido.
- Devanado paso acortada.
- Devanado de doble capa.
- Ranuras inclinadas: Factor de ranura.

El caso del motor del presente proyecto, es el de un devanado distribuido, por lo que se procede a una breve explicación de este caso.

3.2.4. DEVANADO DISTRIBUIDO:

Esta técnica referente al estator, es la que esta desarrollada en el motor de este proyecto, consiste en bobinar las espiras de cada fase en varias bobinas iguales y alojarlas en distintas ranuras contiguas conectándolas en serie.



Si desea colocar un número total Z de ranuras en la máquina, el ángulo que quedaría entre dos ranuras adyacentes sería:

$$\alpha_{mr} = \frac{2\pi}{Z}$$

Y el ángulo eléctrico de ranura:

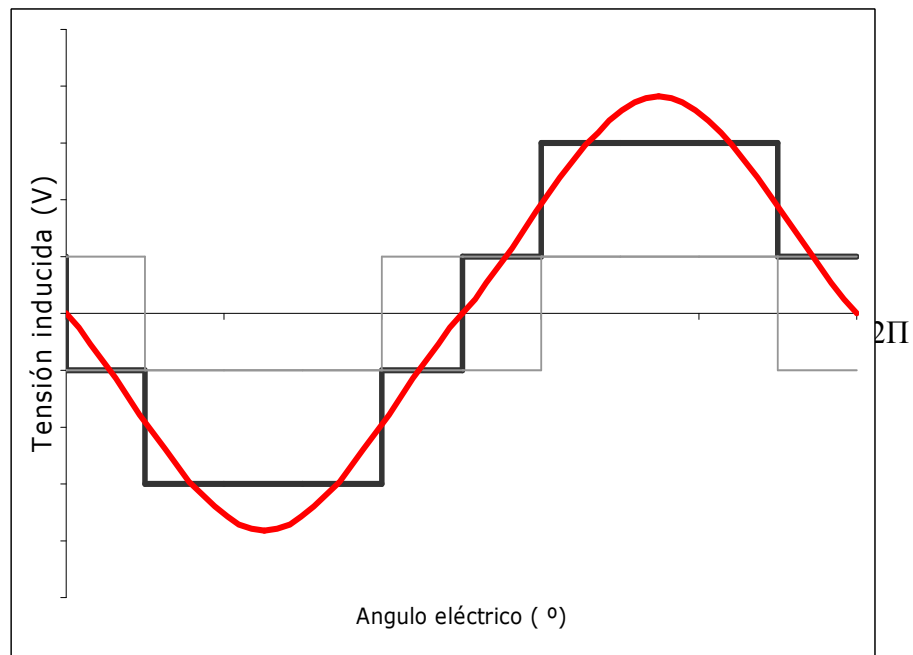
$$\alpha_{er} = p \cdot \alpha_{mr}$$

$$\alpha_{er} = \frac{2\pi \cdot p}{Z}$$

En cada una de las bobinas de la fase se inducirá una tensión con forma de onda cuadrada, desfasadas entre ellas un ángulo α_{er} y de la misma amplitud. La tensión de fase será la suma de las tensiones de todas las bobinas que se componen.

$$e_A(t) = e_{A1}(t) + e_{A2}(t) + e_{A3}(t)$$

La forma de onda de la tensión inducida que verá la bobina A por tanto:



Esta técnica consigue disminuir los armónicos de la tensión inducida, que comparada con la máquina concentrada, el fundamental también se atenúa pero en mucha menor medida. Ésta atenuación se conoce como factor de distribución.

A continuación se presenta la tabla de los factores de distribución en función del valor de "q". Donde "q" es el número de ranuras por polo y fase y presenta la siguiente expresión:

$$q = \frac{Z}{2 \cdot p \cdot m}$$

q	Kd1	Kd3	Kd5	Kd7
2	0.9695	0.707	0.258	-0.258
3	0.9598	0.667	0.217	-0.177
4	0.9577	0.653	0.205	-0.157
5	0.9567	0.547	0.200	-0.157

Los factores de distribución se obtienen con la siguiente fórmula:

$$K_{dn} = \frac{\text{sen} \cdot \left(\frac{n \cdot q \cdot \alpha_{er}}{2} \right)}{q \cdot \text{sen} \cdot \left(\frac{n \cdot \alpha_{er}}{2} \right)}$$

3.2.5. NÚMERO DE PARES DE POLOS.

Se puede definir más o menos los pares de polos como la forma de expresar el número de polos que forman magnéticamente las bobinas o los bobinados de un motor eléctrico.

El hecho de saber este dato característico del motor nos permite establecer la velocidad o el número de revoluciones por minuto de marcha o de régimen de un motor eléctrico. La formula que rige esto es la siguiente:

$$n = \frac{60 \cdot f}{P}$$

De esta fórmula se puede deducir la velocidad de trabajo a la que la máquina trabajará en condiciones normales. Es decir por ejemplo para una máquina con dos polos $p=1$ la velocidad de trabajo será de 3000 rpm.

En el caso se quiera variar la velocidad del motor se tendrá que modificar el valor de algún parámetro de la anterior expresión bien se cambiará la frecuencia de la máquina (con un variador de frecuencia) o el número de pares de polos (máquinas Dahlander).

3.2.6. IMPORTANCIA DEL NÚMERO DE POLOS EN ESTE PROYECTO.

Como se ha dicho con la expresión anterior la velocidad de la maquina depende de los p y la frecuencia. En referencia a nuestra maquina:

En su día se averiguó mediante un sencillo ensayo que nuestro motor tenía dos pares de polos lo cual significa que la velocidad de la máquina es de 1500 rpm.

Esta velocidad nos indica que una vez que se haya hecho la modificación del motor para convertirlo en alternador la velocidad óptima a la que deberá girar el generador de imanes permanentes será de 1500 rpm.

Esta velocidad será prácticamente imposible llegar a alcanzar, porque para hacerse una idea, las palas deberán girar 4 veces por segundo y eso es bastante difícil y peligroso. Se dice peligroso porque la fuerza centrífuga que alcanzaran será muy grande pudiendo causar su propia rotura o incluso causar algún accidente grave.

Las posibles soluciones a este problema de exceso de velocidad son la colocación de una multiplicadora o el tener un generador de más pares de polos.

3.2.6.1. Aumento del número de pares de polos.

Cuanto mayor sea el número de pares de polos menor será la velocidad del generador. La formula que rige esa afirmación es la siguiente:

$$n = \frac{60 \cdot f}{P}$$

La ventaja de tener más pares de polos es evidente, la velocidad de giro. El inconveniente más importante es la dificultad de conseguir un motor con más pares de polos que 3 ya que en la industria se usan principalmente de 2 o incluso de 1.

Para poder solucionar este problema del los pares de polos, todavía queda otra posibilidad, que es la de bobinar a mano el estator con el fin de hacer más bobinas y consiguientemente más pares de polos, pero los problemas que se presentan son por ejemplo: el aumento de complejidad del proyecto, el costo del cobre y el tiempo invertido en rebobinar el motor.

Por ello lo que se ha decidido es mantener el número de pares de polos del motor original, aunque somos conscientes de que eso implicara que el generador

no esté trabajando al máximo de sus posibilidades ya que las palas no alcanzarán esa velocidad.

3.2.7. MULTIPLICADORA:

Es un elemento con el que se puede variar la velocidad de giro del generador.

En nuestro caso se tendrá que conseguir que esa velocidad sea lo más parecido a 1500 rpm, teniendo en cuenta que la velocidad de entrada a la multiplicadora será variable, ya que ésta será dependiente a la velocidad del viento. Como toda máquina mecánica ésta tiene sus ventajas e inconvenientes.

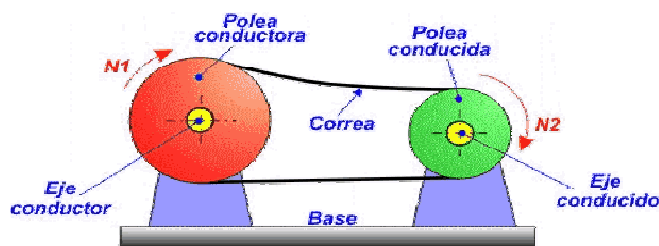
La principal ventaja es la que se ha nombrado, la posibilidad de aumentar la velocidad de giro del generador. Uno de los inconvenientes más claros es la dificultad del comienzo a girar las palas. Con esto se quiero decir que si tenemos el aerogenerador parado le va a costar mucho más ponerse a girar que si no tuviese multiplicadora.

Para poder entender mejor éste hándicap se va a hacer una analogía, por ejemplo con una bici. Si nos imaginamos un ciclista que está andando en llano y se ve el conjunto de la transmisión (platos, cadena y piñones) vemos que el número de veces que hace girar al plato es mucho menor que las vueltas que da un piñón.

Aquí viene la relación de transmisión, ésta se calcula dividiendo el número de dientes del plato por el número de dientes del piñón. Éste número resultado del cociente, es el número de vueltas que da el piñón cuando el plato da una sola.

Siguiendo un poco con el inconveniente y haciendo referencia al ciclista se ve que la fuerza que tiene que hacer con sus piernas es mucho mayor que si disminuimos la relación de transmisión, pero con la ventaja que la rueda de atrás girará mucho más rápido.

Con este ejemplo a lo que se quiere llegar es a que la fuerza que tiene que hacer el viento sobre las palas cuando éstas están paradas es bastante más grande que si no hubiera multiplicadora.



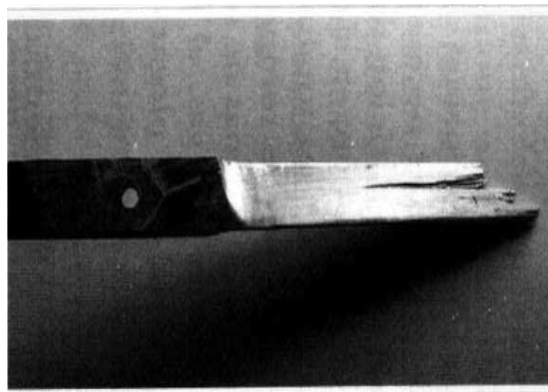
Otros inconvenientes ligados a la multiplicadora es el aumento de la complejidad del aerogenerador, el aumento del costo del proyecto, aumento de averías, ruido, vibraciones etc.

De entre los tipos de multiplicadoras de las que se barajó en un principio destacaban dos: la de plato-piñón-cadena (parecida a la del dibujo) y la de dos engranajes (de diferente tamaño por supuesto).

Por experiencia se ha observado que el primer modelo de multiplicadora daba problemas en cuanto al ruido generado por el plato y piñón con la cadena y sobre todo a que de vez en cuando la cadena se salía.

Este último problema comentado era el peor y más peligroso. Era peligroso porque en el momento que la cadena dejaba de transmitir el movimiento al piñón las palas empezaban a girar sin ningún tipo de carga y se embalaban.

Justamente eso es lo que hay que evitar en cualquier aerogenerador, que las palas giren sin ningún tipo de control. Éste hecho puede ser peligroso para la propia integridad del aerogenerador y más en concreto de las palas y lo más importante, puede causar algún tipo de accidente más serio.



El hecho de que la cadena se salga de los dientes del plato o del piñón puede ser la causa fundamental de dos defectos.

- Una mala tensión de la cadena. Una excesiva tensión puede causar el no giro del plato ni el piñón. Por el contrario si le damos una tensión insuficiente puede causar que la cadena se salga pudiendo suceder lo anteriormente hablado.
- El otro problema es la mala alineación del plato-piñón, es decir estos dos elementos se tienen que encontrar en el mismo plano. Si no es así puede ocurrir que haya vibraciones e incluso que se salga de la cadena.

El otro modelo importante de multiplicadora es el de dos engranajes en contacto.

El gran problema de éste es la difícil obtención de los dos engranajes sobre todo de las medidas que nosotros necesitábamos.

3.3. IMANES.

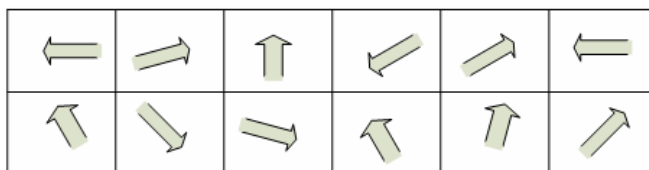
Un imán es un cuerpo o dispositivo con un campo magnético significativo, de forma que tiende a juntarse con otros imanes.

3.3.1. PARTES DE UN IMÁN.

- Eje Magnético: barra de la línea que une los dos polos.
- Línea neutra: Línea de la superficie de la barra que separa las zonas polarizadas.
- Polos: Los dos extremos del imán donde las fuerzas de atracción son más intensas. Estos polos son, el polo norte y el polo sur; también denominados polos positivo y negativo, respectivamente.

Dentro de un material ferromagnético existen zonas denominadas "dominios" dentro de las cuales las moléculas están ordenadas de tal forma que sus campos netos individuales están alineados. En un material virgen, estos dominios tienen orientaciones aleatorias resultando en un campo macroscópicamente nulo.

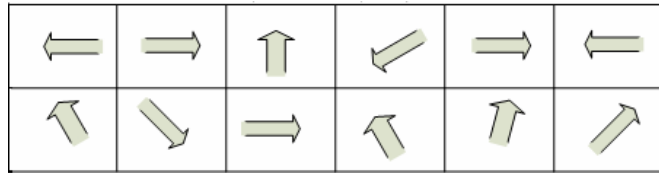
\vec{B}



1º) Material en estado original.

Cuando se aplica un campo externo, los dominios que poseen una orientación similar a la del campo aplicado comienzan a ordenarse según el campo aplicado, comenzando por aquellos que presentan una orientación más favorable.

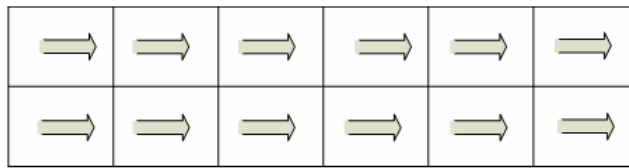
\vec{B}



2º) Pequeño campo aplicado.

Una vez que todos los dominios se alinean con el campo magnético exterior, el material ya no puede seguir reforzando los incrementos del campo externo lo que implica su saturación.

\vec{B}



4º) Material saturado.

3.3.2. TIPOS DE IMANES.

Existen tres tipos de imanes:

3.3.2.1 Imanes naturales.

Un imán natural es un mineral con propiedades magnéticas.

La magnetita es un potente imán natural, tiene la propiedad de atraer todas las sustancias magnéticas. Su característica de atraer trozos de hierro es natural. Esta compuesta por óxido de hierro.

Un imán artificial es un cuerpo de material ferromagnético al que se ha comunicado la propiedad del magnetismo

Un imán temporal, pierde sus propiedades una vez que cesa la causa que provoca el magnetismo.

Un electroimán es una bobina (en el caso mínimo, una espira) por la cual circula corriente eléctrica.

Dentro de los imanes permanentes encontramos lo siguientes tipos:

3.3.2.2 Imanes de Ferrita.

Se llaman así por sus propiedades físicas. Su apariencia es lisa y de color gris oscuro, de aspecto parecido a la porcelana. Se les puede dar cualquier forma, por eso es uno de los imanes más usados (altavoces, aros para auriculares, cilindros para pegar en figuras que se adhieren a las neveras, etc.). Son muy frágiles, pueden romperse si se caen o se acercan a otro imán sin el debido cuidado.

3.3.2.3 Imanes de alnico.

Se llaman así porque en su composición llevan los elementos aluminio, níquel y cobalto. Se fabrican por fusión de un 8 % de aluminio, un 14 % de níquel, un 24 % de cobalto, un 51 % de hierro y un 3 % de cobre. Son los que presentan mejor comportamiento a temperaturas elevadas. Tienen la ventaja de poseer buen precio, aunque no tienen mucha fuerza.

3.3.2.4 Imanes de Tierras Raras.

Son imanes pequeños, de apariencia metálica, con una fuerza de 6 a 10 veces superior a los materiales magnéticos tradicionales. Los imanes de boro/neodimio están formados por hierro, neodimio y boro; tienen alta resistencia a la desmagnetización. Son lo bastante fuertes como para magnetizar y desmagnetizar algunos imanes de alnico y flexibles. Se oxidan fácilmente, por eso van recubiertos con un baño de cinc, níquel o un barniz epoxídico y son bastante frágiles. Son los que se usarán para adaptar el motor a un generador de imanes permanentes debido a sus propiedades.

3.3.3. CLASIFICACIÓN MATERIALES MAGNÉTICOS:

Cuando un material cualquiera es sometido a la acción de un campo magnético de un valor determinado, teóricamente pueden ocurrir tres cosas:

1º) El campo magnético que se establece dentro del material es igual al campo aplicado.

2º) El campo magnético que se establece dentro del material es menor que el campo aplicado.

3º) El campo magnético que se establece dentro del material es mayor que el campo aplicado.

3.3.3.1 DIAMAGNÉTICOS:

Si el campo resultante dentro del material es menor que el campo aplicado, la permeabilidad es menor que 1. Este tipo de materiales, denominados diamagnéticos, tienen la propiedad de magnetizarse negativamente es decir, oponiéndose al campo externo, por lo que serían repelidos por un imán permanente. Existe una gran cantidad de elementos diamagnéticos, pudiendo citarse como ejemplo a metales como el cobre, la plata, el oro, el mercurio, etc., como así también gases, como los gases raros, el nitrógeno, etc.

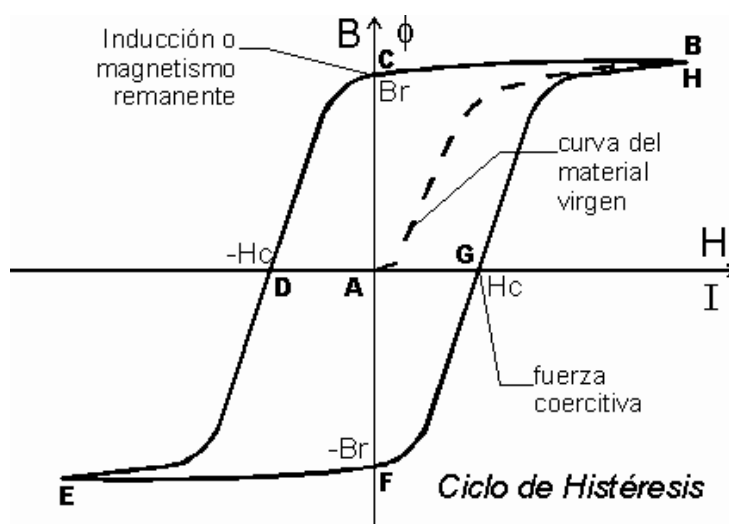
3.3.3.2 PARAMAGNÉTICOS:

Se magnetizan en forma débil y positiva, en el mismo sentido del campo aplicado, por lo que son atraídos por el imán.

3.3.3.3 FERROMAGNÉTICOS:

Si se considera la tabla periódica de los elementos en su conjunto, puede decirse que del orden de la mitad de los elementos que la constituyen son diamagnéticos y la otra mitad son paramagnéticos. Tanto unos como otros, poseen permeabilidades muy próximas a la unidad, es decir que si bien se magnetizan, lo hacen muy débilmente. Pero de todos los elementos de la tabla, hay tres que presentan un comportamiento magnético radicalmente distinto: es la llamada tríada o terna del hierro, el cobalto y el níquel. Estos tres elementos tienen la extraordinaria propiedad de magnetizarse en una proporción enormemente mayor que todos los restantes. Particularmente el hierro presenta una permeabilidad magnética del orden de 10^4 , es decir que desarrolla en su interior un campo magnético 10000 veces superior al que se le aplica externamente.

Si se disminuye el campo magnético H , los dominios comienzan a moverse hacia su dirección inicial, hasta que encuentran una posición estable denominada de "magnetización fácil". Cuando el campo magnético externo se anula, los dominios del material mantienen una componente neta distinta de cero, originando una inducción magnética remanente (B_r). Este efecto permite crear imanes permanentes y es responsable del efecto conocido como histéresis magnética.



En los núcleos magnéticos sometidos a campos magnéticos variables se dan dos tipos de pérdidas: Pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes de Foucault.

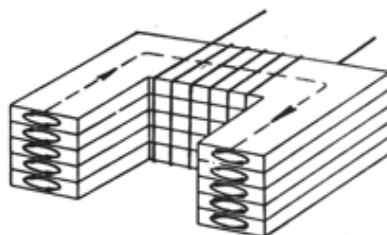
3.3.4. PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS:

Las pérdidas por histéresis corresponden a la energía necesaria para mover los momentos magnéticos de los dominios durante un ciclo de magnetización. Las pérdidas por histéresis cuando se trabaja con campos magnéticos variables son inevitables.

3.3.5. PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE FOUCAULT:

Las pérdidas por corrientes de Foucault también, se originan al someter al núcleo magnético a campos magnéticos variables. Dentro del núcleo se inducen diferencias de potencial, Ley de Faraday, que originan corrientes en su interior.

Para disminuir las pérdidas por corrientes de Foucault se puede laminar el núcleo ó aumentar el valor de la resistividad del material añadiendo silicio.



Núcleo magnético laminado.

3.3.6. ALGUNAS DEFINICIONES EN IMANES PERMANENTES.

Al observar las propiedades de los imanes permanentes se observa alguna nomenclatura que aclaramos a continuación.

La denominación N40, N42, N45, N45H etc. es una medida para la calidad del material empleado en la fabricación del imán.

En número (p.e. 40, 42, 45) se corresponde aproximadamente con el producto energético máximo del imán

La letra N, M, H o letras SH, EH o UH contienen información acerca de la temperatura máxima de uso que puede ser 80, 100, 120, 150, 180 o 200 °C. La mayoría de nuestros imanes comienzan con una "N" y pueden ser expuestos a temperaturas de hasta 80 °C.

3.3.6.1 Temperatura Máxima de Trabajo.

Es la temperatura máxima de exposición que un imán puede resistir sin que se produzcan cambios estructurales o inestabilidades en sus propiedades.

3.3.6.2 Temperatura de CURIE, T_c :

Es la temperatura por encima de la cual los materiales ferromagnéticos se vuelven paramagnéticos, perdiendo sustancialmente todas sus propiedades magnéticas permanentes. Depende normalmente de la composición química del material magnético.

3.3.6.3 Consejos importantes para el trato con imanes de Neodimio.

Al adquirir el lote de imanes de Neodimio hay que tener ciertas pautas en cuenta:

Fragmentación: Estos imanes pueden llegar a romperse. La causa más común es una colisión incontrolada. Esto ocurre sobre todo en la colisión entre imanes de disco e imanes de bola y pueden llegar a producirse saltos de fragmentos. Es recomendable hacer uso de guantes y gafas de protección pero la mayor garantía es prevenir la colisión.

Peligro en Niños: Existe peligro de que los niños introduzcan pequeños imanes en los enchufes. Estos imanes no están indicados como juguetes ya que

pueden ser ingeridos fácilmente y en este caso hay que tener en cuenta que pueden fijarse en el intestino con riesgo de muerte.

Contusiones: imanes grandes pueden generar una gran fuerza cuando son acercados y una parte del cuerpo, por ejemplo un dedo, puede quedar aprisionado causando hematomas por lo que conviene utilizar guantes y tener cuidado.

Magnetismo: Conviene mantener una distancia entre aparatos y objetos que pueden ser dañados por fuerzas magnéticas como televisores, monitores, tarjetas de banco, ordenadores, dispositivos de almacenamiento altavoces... también los marcapasos por lo que hay que prestar atención ante estos casos.

Alergia al Níquel: Estos imanes están recubiertos de níquel que es un material que puede causar reacciones alérgicas sobre algunas personas. Alergias al níquel pueden ser adquiridas tras un contacto prolongado con objetos que desprendan níquel. Evitar por lo tanto como medida de precaución el contacto prolongado con imanes recubiertos de níquel y abstenerse por completo si se posee alergia al material.

Desgaste o astillamiento del recubrimiento: Los imanes están recubiertos de níquel oro o plata. Esta capa puede ser desgastada debido al uso, especialmente al choque repetido entre imanes provoca una gran presión en las zonas de contacto lo que conlleva inevitablemente una pérdida o astillamiento del recubrimiento.

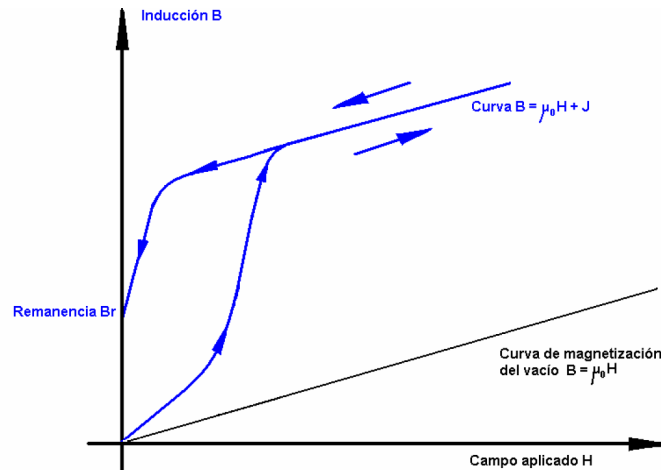
Mecanizar, taladrar, serrar o exposición al fuego: Los imanes pueden ser encolados para su sujeción pero en ningún caso hay que cortar o taladrar los imanes. Estos imanes se resquebrajarían y el polvo es fácilmente inflamable. Los imanes han sido mecanizados con una herramienta de diamante bajo refrigeración por agua. Hay que mantener los imanes alejados de llamas o fuentes de calor ya que bajo temperaturas superiores a 80º la magnetización de los imanes de neodimio disminuye rápidamente e incluso si se supera la temperatura de Curie perder su magnetismo.

Efectos sobre el hombre: Existe controversia sobre si los imanes influyen en el organismo. Las investigaciones han demostrado que hasta la fecha las fuerzas magnéticas son demasiado débiles para ejercer algún efecto detectable en el hombre. En cualquier caso, como esto no es definitivo y en el futuro pueden existir nuevos métodos que rectifiquen los resultados actuales para ir sobre seguro no se debe de exponer de manera continuada a la influencia de imanes y es preferible guardar una distancia de al menos un metro entre imanes de grandes dimensiones y el cuerpo humano.

3.4. CURVAS DE MAGNETIZACIÓN DE IMANES.

3.4.1. HISTÉRESIS.

Los materiales ferromagnéticos presentan lo que se denomina técnicamente histéresis y que se manifiesta en la curva de magnetización de la siguiente forma:



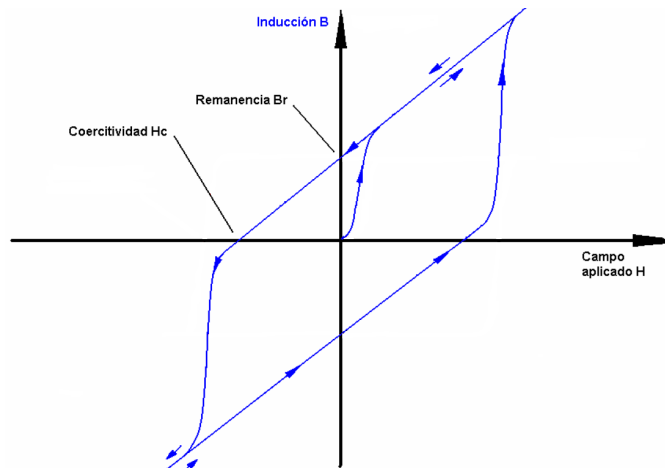
Se observa, que la curva parte del origen del sistema de coordenadas con campo aplicado nulo y campo inducido nulo. Al aumentar el campo aplicado, la inducción magnética B va creciendo según una típica forma de "S". Después de la saturación, la inducción sigue aumentando sólo por el aporte de H , puesto que el material ya no puede aumentar más su polarización intrínseca. Al disminuir el campo aplicado, se observa que la inducción no retorna por la misma curva, sino que sigue un camino distinto. Se observa además, que al suspender totalmente el campo aplicado (cuando $H=0$), sigue existiendo una inducción residual que se denomina remanencia, o inducción remanente y se representa como B_r . Cuando el material se magnetizó hasta la saturación, la remanencia se denomina remanencia de saturación y es un parámetro característico de cada material.

Los materiales que presentan una remanencia baja se denominan materiales magnéticos "blandos", dado que oponen poca resistencia a la magnetización y desmagnetización. En estos materiales la remanencia es una propiedad indeseable y se procura por diversos medios tecnológicos que sea lo más baja posible.

Los materiales que presentan una remanencia alta, se denominan materiales magnéticos duros, o imanes permanentes. En estos materiales la remanencia es una propiedad buscada y por lo general resulta de interés práctico que sea lo más alta posible y es lo que aquí se buscará en este proyecto para la generación de campos magnéticos en el entrehierro de la maquina.

Pero para el análisis de los materiales magnéticos duros lo que resulta de interés es el segundo cuadrante ya que es el cuadrante en el que trabajará el imán calculado para utilizar en este proyecto

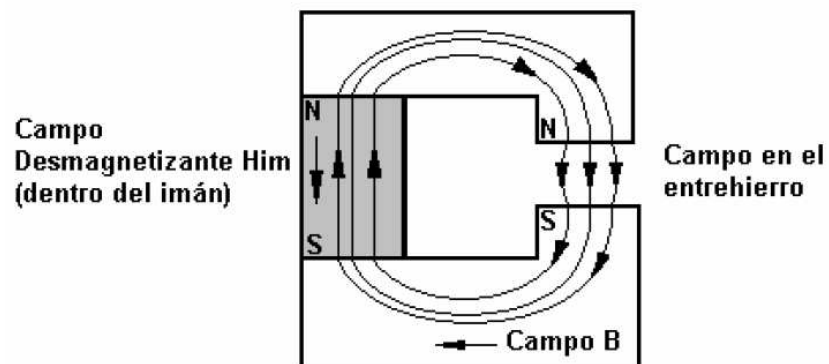
3.4.2. CURVA DE MAGNETIZACIÓN DEL SEGUNDO CUADRANTE.



Cuando el campo aplicado disminuye a cero, el material retiene una magnetización que se denomina remanencia. Si se empieza a aplicar campo en sentido contrario, el material aún permanece magnetizado en el mismo sentido. Si se continúa aumentando el campo en sentido contrario, se comienzan a reordenar los dominios en sentido contrario, comenzando por los más débiles, hasta que, aplicado un campo suficientemente grande (denominado campo coercitivo o coercitividad), dicho campo vence la remanencia y el material queda con una inducción nula. La H_c , a veces denominada H_{cB} , es el campo aplicado que anula la inducción magnética B.

3.5. CIRCUITOS MAGNÉTICOS.

En la mayoría de las utilizaciones prácticas de los imanes, el flujo no está en corto circuito sino que debe atravesar un entrehierro.



Esto hace aparecer dentro del imán lo que se denomina "campo desmagnetizante", por lo que el punto de trabajo del mismo ya no es la intersección del diagrama con el eje B, sino que se sitúa en algún otro punto de la curva de desmagnetización.

La inducción B sigue siendo positiva (la remanencia del imán mantiene el flujo magnético en el mismo sentido en que se magnetizó en el primer cuadrante), pero dentro del imán aparece un campo desmagnetizante $-H_m$, en sentido opuesto al campo inductor que originalmente magnetizó el material. Por tal motivo (B positivo y H negativo), el imán adopta un punto de trabajo en el segundo cuadrante de la curva de desmagnetización.

Este esquema es la aproximación que se utilizara para simular el circuito magnético del proyecto ya que en este caso se tienen 2 imanes y dos entrehierros que por analogía se pueden considerar con un imán del doble de espesor y un entrehierro de doble longitud, es decir, el circuito magnético resultante es el resultado de considerar el recorrido realizado por el flujo al atravesar uno de los imanes, el primer entrehierro, el estator de la maquina, y cerrarse atravesando el otro entrehierro y el imán del polo opuesto al primero.

3.5.1. ALGUNAS ECUACIONES RELACIONADAS A LAS MAGNITUDES MAGNETICAS.

3.5.1.1 LEY DE AMPERE:

La circulación de corriente eléctrica por un conductor genera un campo magnético alrededor de dicho conductor. La relación entre el campo magnético generado y la corriente se obtiene a partir de la ecuación de Ampere:

$$\oint H \cdot dl = i_{neta}$$

Donde H es la intensidad de campo que se mide en amperios-vuelta.

Para el caso de una bobina con N espiras que rodea un núcleo magnético la ecuación de Ampere queda de la siguiente forma:

$$\oint H \cdot dl = i_{neta} = N \cdot i$$

3.5.1.2 Definición de permeabilidad.

La permeabilidad magnética de un material se define como el cociente entre el campo total que se induce dentro del material (inducción magnética B) y

el campo magnético aplicado (campo H). La ecuación que lo expresa matemáticamente es la siguiente:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Dicho de otra forma, en un campo magnético de magnitud H , se introduce un material con permeabilidad μ , por lo que dentro de dicho material se establece un campo magnético total B cuya magnitud es μ veces el campo H aplicado.

3.5.1.3 Permeabilidad en el Sistema Internacional:

En el Sistema Internacional la inducción magnética B se mide en Tesla y el campo H en A/m (esta última unidad no tiene nombre específico, aunque alguna vez se propuso denominarlo "Lenz"). Ambas magnitudes no son ni numérica, ni dimensionalmente iguales. Por ende, la permeabilidad no puede ser ni unitaria, ni adimensional. En el Sistema Internacional:

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \mu_r \cdot H$$

Donde:

B [Tesla]: Inducción magnética

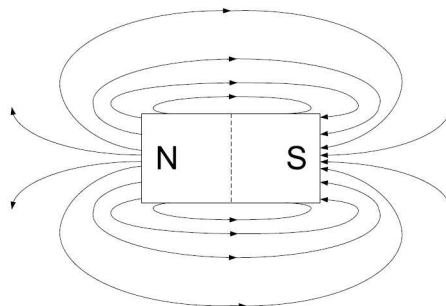
H [A/m]: Campo inductor

μ_0 = permeabilidad magnética del vacío = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m = $4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A.m

μ_r = permeabilidad relativa del medio relativa al vacío, igual a la permeabilidad en el sistema cgs, igual a la unidad para el vacío.

3.5.1.4 Idea de "línea de fuerza".

Representación gráfica de los campos magnéticos la cual consiste en dibujar un conjunto de "líneas de fuerza" que indican la dirección del campo magnético, dándose además una idea de la intensidad del mismo por la "densidad de líneas" en cada lugar:



3.5.1.5 Flujo y densidad de flujo.

Se puede imaginar al campo B en un punto determinado como densidad de líneas, o sea, cantidad de líneas por unidad de superficie, también se podría imaginar que una superficie abierta cualquiera sería atravesada por una cantidad determinada de líneas. La cantidad de líneas de fuerza que atraviesan una superficie determinada se denomina flujo magnético.

El flujo magnético es el flujo del vector campo magnético a través de una superficie determinada, que tiene en cuenta, además de la densidad de flujo en cada punto, la orientación del área considerada en relación a la dirección del campo:

$$\phi = \oint B \cdot dA$$

3.5.1.6 LEY DE FARADAY:

Cuando el flujo magnético abarcado por una espira varía, se induce en esta una tensión e, habitualmente llamada fuerza electromotriz (fem), cuyo módulo es igual a la derivada del flujo.

Esta variación del flujo puede ser debida a una variación temporal del campo magnético, a una variación en la posición relativa de la espira respecto del mismo, o bien a una combinación simultánea de ambas como en el caso de las máquinas rotativas. En éstas, la variación del flujo se debe a la variación del campo magnético temporalmente que se produce por la disposición de las ranuras y a la variación en la posición relativa de los devanados debido al movimiento giratorio del rotor.

Por lo tanto, la expresión de la tensión inducida en una espira es la siguiente:

$$e = - \left| \frac{d\phi}{dt} \right|$$

Y para el bobinado completo de N espiras:

$$e = -N \left| \frac{d\phi}{dt} \right|$$

3.5.1.7 LEY DE LENZ:

Los voltajes inducidos serán de un sentido tal, que se opongan a la variación del flujo magnético que las produjo. Es decir, la polaridad de un voltaje inducido es tal, que tiende a producir una corriente, cuyo campo magnético se opone siempre a las variaciones del campo existente producido por la corriente original.

Por lo tanto el signo negativo de la expresión anterior indica que la tensión inducida se opone a la variación de flujo que la produce.

3.5.1.8 Consideraciones de las formulas magneticas.

El punto de la curva de desmagnetización en que se va a operar el imán una vez colocado en un circuito magnético determinado, es decir los valores de B y H que efectivamente van a existir dentro del mismo, dependen de la geometría del imán, del núcleo y del entrehierro. Para calcular el punto de trabajo del imán en un circuito magnético es necesario utilizar dos ecuaciones fundamentales de los circuitos magnéticos.

$$\oint H \cdot dl = 0 \quad \text{y} \quad \oint B \cdot dA = 0$$

La primera ecuación expresa que la integral curvilínea del campo aplicado a lo largo de una línea cerrada, es nula. La segunda expresa que en cualquier superficie cerrada el flujo entrante a la misma es igual al flujo saliente.

Como se vera en el apartado de cálculos, introduciremos algunas simplificaciones como que el campo H es constante a lo largo del imán. Adoptamos la misma simplificación para el núcleo magnético y el entrehierro. Con tales simplificaciones la ecuación queda:

$$H_{im} \cdot L_{im} + H_h \cdot L_h + H_{eh} \cdot L_{eh} = 0$$

A los fines didácticos, suponemos que la permeabilidad del núcleo magnético es muy grande en relación a la del aire del entrehierro, es decir supondremos que: $H_h \cdot L_h \ll H_{eh} \cdot L_{eh}$. Entonces la ecuación queda:

$$H_{im} \cdot L_{im} + H_{eh} \cdot L_{eh} = 0$$

O lo que es lo mismo:

$$H_{im} \cdot L_{im} = - H_{eh} \cdot L_{eh}$$

Esta ecuación permite determinar el campo desmagnetizante que existirá dentro del imán, teniendo como datos el campo requerido en el entrehierro, la longitud del entrehierro y la longitud del imán como se puede observar en el apartado de calculo de imanes.

3.5.1.9 Concepto de Producto de Energía.

Cualquier punto de una curva de desmagnetización está caracterizado por un B y un H determinados.

El significado físico el producto B*H. Analizando el producto dimensionalmente se llega a la siguiente conclusión:

$$B \text{ [Wb/m}^2\text{]} \times H \text{ [A/m]} = B \times H \text{ [Wb.A/m}^3\text{]}$$

Pero Wb = Volt*s, entonces:

$$B \times H \text{ [Wb.A/m}^3\text{]} = B \times H \text{ [V*A*s /m}^3\text{]} = B \times H \text{ [W*s / m}^3\text{]} = B \times H \text{ [Joule / m}^3\text{]}$$

Entonces, el producto BxH tiene dimensión de energía por unidad de volumen.

Para cualquier punto de la curva de desmagnetización de un material magnético, el producto de las coordenadas B y H de dicho punto, indica la cantidad de energía que 1 m³ de dicho material puede imponer al espacio cuando está polarizado para trabajar en dicho punto.

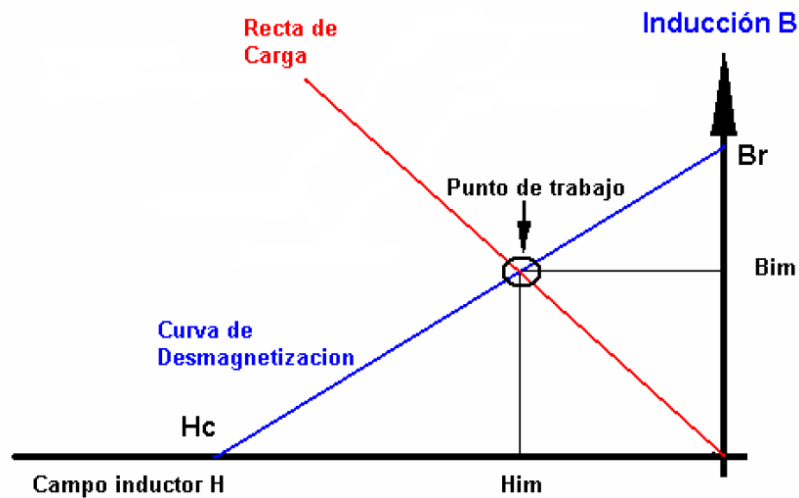
El producto energético máximo define la máxima energía magnética almacenada en un imán. Se trata del producto máximo alcanzable de densidad de flujo B e intensidad del campo H.

3.5.1.10 Concepto de recta de carga.

El punto de trabajo del imán es la intersección de la curva de desmagnetización del imán con la recta de carga. La curva de desmagnetización es propia del material con el que está construido el imán y expresa cual será la densidad de flujo magnético B para cada campo H. Este último puede ser el campo inductor aplicado externamente o el campo desmagnetizante que se establece dentro del imán en las distintas condiciones de trabajo.

La recta de carga introduce la geometría del circuito magnético en general, incluyendo medidas propias del imán (Área y longitud del imán) y las del entrehierro (Área y longitud del entrehierro). El punto de trabajo satisface

simultáneamente ambas cosas y expresa los parámetros magnéticos que se establecerán dentro del imán en una situación de trabajo determinada.



La curva de desmagnetización es propia del material con el que está construido el imán.

La recta de carga es propia del circuito magnético en el que trabaja el imán.

3.6. CALCULO IMANES.

Para el calculo de imanes lo primero es realizar las medidas correspondientes de la maquina. Para ello una vez desmontado el rotor y con la ayuda de un calibre medimos:

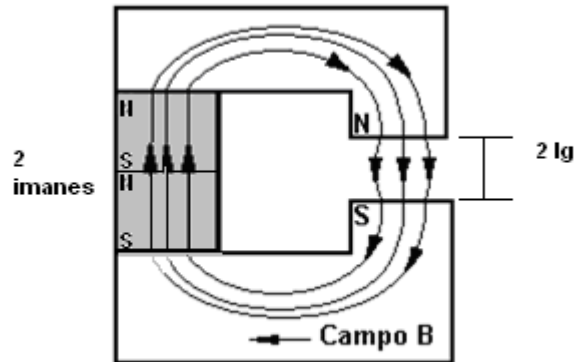
Longitud del rotor: 130,69 mm.

Diámetro del rotor: 114.32mm.

Después se procede a la medición del estator. En el estator la longitud es la misma, 130,69mm, pero no así la del entrehierro. En este punto encontramos en este caso con el problema de medir el diámetro interior del entrehierro ya que las cabezas de las bobinas impiden la utilización de un calibre de manera directa. Para salvar este impedimento se colocan dos tablillas en dos ranuras del estator enfrentadas para proceder con el calibre a la medición del diámetro ya que ahora se ha superado el problema de las cabezas del bobinado, obteniendo un resultado de 114,97 mm.

Esto nos da como resultado un entrehierro de 0,65 mm, pero ha de tenerse en cuenta que este resultado es de restar el diámetro del rotor al diámetro del estator, por lo que la medida del entrehierro resultante es teniendo en cuenta ambos lados de entrehierro, en el caso de necesitarlo para los cálculos.

Simularemos nuestro circuito eléctrico al siguiente sistema:



Para calcular la longitud o espesor de los imanes es necesario utilizar la Ley de Ampere:

$$\oint H \cdot dl = i_{neta} = 0$$

Hay que tener en cuenta a la vista del circuito magnético que tenemos imanes y entrehierro por lo que ambos términos deberán aparecer en la integral a través de una superficie cerrada:

$$H_{iman} \cdot l_{iman} + H_g \cdot l_g = 0$$

Teniendo en cuenta que son dos imanes y se cuenta dos veces el entrehierro y reordenando queda:

$$H_{iman} \cdot 2l_{iman} = -H_g \cdot 2l_g$$

Además:

$$\phi = \oint B \cdot dS \quad \text{y} \quad B = H \cdot \mu$$

En el entrehierro:

$$B_g = H_g \cdot \mu_0$$

En una primera aproximación, se considera que $B_{iman} = B_g$ y el entrehierro se mantiene igual al original de la maquina debido a que todavía no se ha tenido en cuenta el proceso constructivo y de esta manera se agilizarán los cálculos del proceso de selección de los imanes.

Para realizar los cálculos posteriores no se tendrá en cuenta esta aproximación.

Por lo tanto en el imán:

$$B_{iman} = B_r + \frac{H_{iman}}{H_c} \cdot B_r$$

Despejando las formulas que serán de utilidad:

$$H_g = -\frac{B_r \cdot H_c \cdot l_{iman}}{(H_c \cdot \mu \cdot l_{iman}) + (B_r \cdot l_g)}$$

$$H_{im} = \frac{H_g \cdot l_g}{l_{iman}}$$

Llegados a este punto se puede ver que son necesarios los datos de los posibles imanes por lo que gracias a las tablas de uno de los distribuidores que aparece en la bibliografía se puede continuar con las operaciones.

Calidad	Tipo	Remanencia Br (T)	Coercitividad	
			HcB (KA/m)	HcJ (KA/m)
Ferrita	Y10T	0.2	128-160	210-280
	Y30	0.38 - 0.40	167-215	-
	Y30BH	0.38 - 0.40	223 - 239	-
Neodimio	N42	1,29-1,32	860 - 955	>955
	Nd38	1,22 - 1,26	876 - 923	>955
	Nd35UH	1,17 - 1,21	860 - 907	>1990
Samario	Sm1Co5	0,85 - 0,90	620 - 648	>1194
	Sm2Co17	1,00 - 1,10	653 - 717	>1194
Alnico	LNG-40	1.10-1.22	46-48	-
	LNG-44	1.20-1.24	48-52	>48
Cinta Magnética	CM1	0,16	95	99
	CM2	0,24	150	200

Calidad	Pr. Energía BH max. (kJ/m3)	Densidad g/cm3	T ^a Curie (°C)	T ^a Max. Tjo. (°C)
Ferrita	6,4 - 9,6	4,8	450	250
	26,3 - 29,5	4,5 - 4,9	450	250
	27,1 - 30,3	4,5 - 4,9	450	250
Neodimio	318 - 334	7,4 - 7,6	310	80
	287 - 302	7,4 - 7,6	310	80
	263 - 279	7,4 - 7,6	350	180
Samario	127 - 143	8,0 - 8,2	720	250
	183 - 223	8,2 - 8,4	825	350
Álnico	37-40	7.3	890	425
	40-44	7.2-7.3	890	725
Cinta Magnética	7,5	2	450	80
	11	2	450	80

En la tabla aparecen distintos tipos de imanes según el material en el que están realizados y según el subtipo de imán dentro del material por lo que para proceder al cálculo de que imán necesitamos se hace uso de la hoja de cálculo (Excel). El fin de esta tabla es el de conseguir el campo magnético de cada imán para poder elegir uno de ellos. Este campo magnético ha de ser cercano a aquel que produce saturación en el estator.

El estator al ser de acero al silicio y gracias a las tablas sabemos que es de 1,5 T, así pues el imán necesario será aquel que genere entre 1 y 1,2 T.

Con los datos de la tabla como B_r , H_c , para cada tipo de imán, longitud entrehierro, permeabilidad del vacío, se obtiene la siguiente tabla. La tabla esta realizada teniendo en cuenta las posibles medidas que tiene el suministrador para ceñirnos a las posibilidades de compra.

Además tendremos en cuenta los siguientes datos:

Longitud Rotor: 130,69 mm.
Radio Rotor: 57,16 mm.
Perímetro del Rotor: 0,35914 m.
Número de Pares de Polos: 4.
Perímetro de un Polo: 0,08978 m.
Longitud del entrehierro: 0,000324 m.

También se ha supuesto un espesor del pegamento que una vez adaptado el rotor unirá los imanes al propio rotor de: 0.0015 m.

Material	Imanes (mm)	L imán (mm)	Hg (A/m)	H imán (A/m)	B por cada imán (T)
Neodimio					
<u>N42</u>	8x3,5x2	0,002	-3,65E+05	-5,91E+04	0,458
318 - 334 (kJ/m3)BH	10x5x2	0,002	-3,65E+05	-5,91E+04	0,458
1,29 - 1,32 Br (T)	20x10x2	0,002	-3,65E+05	-5,91E+04	0,458
860 - 955 Hc (KA/m)	23x10x1	0,001	-2,21E+05	-7,16E+04	0,278
	25x10x2	0,002	-3,65E+05	-5,91E+04	0,458
	90x10x1	0,001	-2,21E+05	-7,16E+04	0,278
	10x6x5	0,005	-5,97E+05	-3,87E+04	0,750
	30x7x10	0,01	-7,58E+05	-2,46E+04	0,953
	40x10x10	0,01	-7,58E+05	-2,46E+04	0,953
	50x50x20	0,02	-8,77E+05	-1,42E+04	1,101
<u>Nd38</u>	8x3,5x2	0,002	-8,38E+05	-1,36E+05	1,053
287 - 302 (kJ/m3) BH	10x5x2	0,002	-8,38E+05	-1,36E+05	1,053
1,22 - 1,26 Br (T)	20x10x2	0,002	-8,38E+05	-1,36E+05	1,053
876 - 923 Hc (KA/m)	23x10x1	0,001	-7,28E+05	-2,36E+05	0,915
	25x10x2	0,002	-8,38E+05	-1,36E+05	1,053
	90x10x1	0,001	-7,28E+05	-2,36E+05	0,915
	10x6x5	0,005	-9,22E+05	-5,97E+04	1,158
	30x7x10	0,01	-9,53E+05	-3,09E+04	1,197
	40x20x10	0,01	-9,53E+05	-3,09E+04	1,197
	50x50x20	0,02	-9,70E+05	-1,57E+04	1,218
<u>Nd35UH</u>	8x3,5x2	0,002	-8,07E+05	-1,31E+05	1,014
263 - 279 (kJ/m3) BH	10x5x2	0,002	-8,07E+05	-1,31E+05	1,014
1,17 - 1,21 Br (T)	20x10x2	0,002	-8,07E+05	-1,31E+05	1,014
860 - 907 Hc (KA/m)	23x10x1	0,001	-7,03E+05	-2,28E+05	0,883
	25x10x2	0,002	-8,07E+05	-1,31E+05	1,014
	90x10x1	0,001	-7,03E+05	-2,28E+05	0,883
	10x6x5	0,005	-8,86E+05	-5,74E+04	1,113
	30x7x10	0,01	-9,16E+05	-2,97E+04	1,150
	40x20x10	0,01	-9,16E+05	-2,97E+04	1,150
	50x50x20	0,02	-9,31E+05	-1,51E+04	1,170
Samario					

<u>Sm1Co5</u>	10x5x3	0,003	-6,23E+05	-6,73E+04	0,782
127 - 143 (kJ/m3) BH	15x15x3	0,003	-6,23E+05	-6,73E+04	0,782
0,85 - 0,90 Br (T)	20x10x2,5	0,0025	-6,10E+05	-7,90E+04	0,766
620 - 648 Hc (KA/m)	62x62x2	0,002	-5,91E+05	-9,58E+04	0,743
	20x12x5	0,005	-6,50E+05	-4,21E+04	0,817
	30x10x6	0,006	-6,58E+05	-3,55E+04	0,826
	62x62x10	0,01	-6,73E+05	-2,18E+04	0,845
<u>Sm2Co17</u>	15x15x3	0,003	-7,39E+05	-7,98E+04	0,928
183 - 223 (kJ/m3) BH	20x10x2,5	0,0025	-7,22E+05	-9,35E+04	0,907
1,00 - 1,10 Br (T)	62x62x2	0,002	-6,98E+05	-1,13E+05	0,877
653 - 717 Hc (KA/m)	20x12x5	0,005	-7,75E+05	-5,02E+04	0,973
	30x10x6	0,006	-7,84E+05	-4,24E+04	0,985
	62x62x10	0,01	-8,04E+05	-2,61E+04	1,010
Ferrita					
<u>Y10T</u>	4x4x2	0,002	-1,35E+05	-2,19E+04	0,170
6,4 - 9,6 (kJ/m3) BH	5x5x2	0,002	-1,35E+05	-2,19E+04	0,170
0.2 Br (T)	9x5x2,5	0,0025	-1,39E+05	-1,81E+04	0,175
128-160 Hc (KA/m)	40x25x15	0,015	-1,56E+05	-3,36E+03	0,195
	100x100x10	0,01	-1,54E+05	-4,98E+03	0,193
<u>Y30</u>	4x4x2	0,002	-2,46E+05	-3,98E+04	0,309
26,3 - 29,5 (kJ/m3) BH	5x5x2	0,002	-2,46E+05	-3,98E+04	0,309
0.38 - 0.40 Br (T)	9x5x2,5	0,0025	-2,56E+05	-3,32E+04	0,322
167-215 Hc (KA/m)	40x25x15	0,015	-3,00E+05	-6,48E+03	0,377
	100x100x10	0,01	-2,95E+05	-9,56E+03	0,370
<u>Y30BH</u>	4x4x2	0,002	-2,55E+05	-4,13E+04	0,320
27,1 - 30,3 (kJ/m3) BH	5x5x2	0,002	-2,55E+05	-4,13E+04	0,320
0,38 - 0,40 Br (T)	9x5x2,5	0,0025	-2,64E+05	-3,43E+04	0,332
223 - 239 Hc (KA/m)	40x25x15	0,015	-3,02E+05	-6,52E+03	0,379
	100x100x10	0,01	-2,98E+05	-9,64E+03	0,374

Continuación

Imanes (mm)	Espesor del imán y el pegamento	Radio rotor con imanes y pegamento	Perímetro del rotor	Perímetro de un polo	Superficie de un polo
Neodimio <u>N42</u>					
8x3,5x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
10x5x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
20x10x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
23x10x1	2,50E-03	5,47E-02	3,43E-01	8,59E-02	1,12E-02
25x10x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
90x10x1	2,50E-03	5,47E-02	3,43E-01	8,59E-02	1,12E-02
10x6x5	6,50E-03	5,07E-02	3,18E-01	7,96E-02	1,04E-02
30x7x10	1,15E-02	4,57E-02	2,87E-01	7,17E-02	9,37E-03
40x10x10	1,15E-02	4,57E-02	2,87E-01	7,17E-02	9,37E-03
50x50x20	2,15E-02	3,57E-02	2,24E-01	5,60E-02	7,32E-03
Neodimio <u>Nd38</u>					
8x3,5x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
10x5x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
20x10x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
23x10x1	2,50E-03	5,47E-02	3,43E-01	8,59E-02	1,12E-02
25x10x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
90x10x1	2,50E-03	5,47E-02	3,43E-01	8,59E-02	1,12E-02
10x6x5	6,50E-03	5,07E-02	3,18E-01	7,96E-02	1,04E-02
30x7x10	1,15E-02	4,57E-02	2,87E-01	7,17E-02	9,37E-03
40x20x10	1,15E-02	4,57E-02	2,87E-01	7,17E-02	9,37E-03
50x50x20	2,15E-02	3,57E-02	2,24E-01	5,60E-02	7,32E-03
Neodimio <u>Nd35UH</u>					
8x3,5x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
10x5x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
20x10x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
23x10x1	2,50E-03	5,47E-02	3,43E-01	8,59E-02	1,12E-02
25x10x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
90x10x1	2,50E-03	5,47E-02	3,43E-01	8,59E-02	1,12E-02
10x6x5	6,50E-03	5,07E-02	3,18E-01	7,96E-02	1,04E-02
30x7x10	1,15E-02	4,57E-02	2,87E-01	7,17E-02	9,37E-03
40x20x10	1,15E-02	4,57E-02	2,87E-01	7,17E-02	9,37E-03
50x50x20	2,15E-02	3,57E-02	2,24E-01	5,60E-02	7,32E-03

Samarium <u>Sm1Co5</u>					
10x5x3	4,50E-03	5,27E-02	3,31E-01	8,27E-02	1,08E-02
15x15x3	4,50E-03	5,27E-02	3,31E-01	8,27E-02	1,08E-02
20x10x2,5	4,00E-03	5,32E-02	3,34E-01	8,35E-02	1,09E-02
62x62x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
20x12x5	6,50E-03	5,07E-02	3,18E-01	7,96E-02	1,04E-02
30x10x6	7,50E-03	4,97E-02	3,12E-01	7,80E-02	1,02E-02
62x62x10	1,15E-02	4,57E-02	2,87E-01	7,17E-02	9,37E-03
Samarium <u>Sm2Co17</u>					
15x15x3	4,50E-03	5,27E-02	3,31E-01	8,27E-02	1,08E-02
20x10x2,5	4,00E-03	5,32E-02	3,34E-01	8,35E-02	1,09E-02
62x62x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
20x12x5	6,50E-03	5,07E-02	3,18E-01	7,96E-02	1,04E-02
30x10x6	7,50E-03	4,97E-02	3,12E-01	7,80E-02	1,02E-02
62x62x10	1,15E-02	4,57E-02	2,87E-01	7,17E-02	9,37E-03
Ferrita <u>Y10T</u>					
4x4x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
5x5x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
9x5x2,5	4,00E-03	5,32E-02	3,34E-01	8,35E-02	1,09E-02
40x25x15	1,65E-02	4,07E-02	2,55E-01	6,39E-02	8,35E-03
100x100x10	1,15E-02	4,57E-02	2,87E-01	7,17E-02	9,37E-03
Ferrita <u>Y30</u>					
4x4x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
5x5x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
9x5x2,5	4,00E-03	5,32E-02	3,34E-01	8,35E-02	1,09E-02
40x25x15	1,65E-02	4,07E-02	2,55E-01	6,39E-02	8,35E-03
100x100x10	1,15E-02	4,57E-02	2,87E-01	7,17E-02	9,37E-03
Ferrita <u>Y30BH</u>					
4x4x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
5x5x2	3,50E-03	5,37E-02	3,37E-01	8,43E-02	1,10E-02
9x5x2,5	4,00E-03	5,32E-02	3,34E-01	8,35E-02	1,09E-02

40x25x15	1,65E-02	4,07E-02	2,55E-01	6,39E-02	8,35E-03
100x100x10	1,15E-02	4,57E-02	2,87E-01	7,17E-02	9,37E-03

Continuación.

Imanes (mm)	Anchura imanes (m)	Nº de imanes a lo ancho	Largura imanes (m)	Nº imanes a lo largo	Nº imanes en la superficie de un polo	Flujo por polo
Neodimio N42						
8x3,5x2	3,5E-03	24,08	8,0E-03	16,34	393,42	5,04E-03
10x5x2	5,0E-03	16,86	1,0E-02	13,07	220,31	5,04E-03
20x10x2	1,0E-02	8,43	2,0E-02	6,53	55,08	5,04E-03
23x10x1	1,0E-02	8,59	2,3E-02	5,68	48,79	3,12E-03
25x10x2	1,0E-02	8,43	2,5E-02	5,23	44,06	5,04E-03
90x10x1	1,0E-02	8,59	9,0E-02	1,45	12,47	3,12E-03
10x6x5	6,0E-03	13,26	1,0E-02	13,07	173,33	7,80E-03
30x7x10	7,0E-03	10,25	3,0E-02	4,36	44,64	8,93E-03
40x10x10	1,0E-02	7,17	4,0E-02	3,27	23,43	8,93E-03
50x50x20	5,0E-02	1,12	5,0E-02	2,61	2,93	8,06E-03
Neodimio Nd38						
8x3,5x2	3,5E-03	24,08	8,0E-03	16,34	393,42	1,16E-02
10x5x2	5,0E-03	16,86	1,0E-02	13,07	220,31	1,16E-02
20x10x2	1,0E-02	8,43	2,0E-02	6,53	55,08	1,16E-02
23x10x1	1,0E-02	8,59	2,3E-02	5,68	48,79	1,03E-02
25x10x2	1,0E-02	8,43	2,5E-02	5,23	44,06	1,16E-02
90x10x1	1,0E-02	8,59	9,0E-02	1,45	12,47	1,03E-02
10x6x5	6,0E-03	13,26	1,0E-02	13,07	173,33	1,20E-02
30x7x10	7,0E-03	10,25	3,0E-02	4,36	44,64	1,12E-02
40x20x10	2,0E-02	3,59	4,0E-02	3,27	11,72	1,12E-02
50x50x20	5,0E-02	1,12	5,0E-02	2,61	2,93	8,92E-03
Neodimio Nd35UH						
8x3,5x2	3,5E-03	24,08	8,0E-03	16,34	393,42	1,12E-02
10x5x2	5,0E-03	16,86	1,0E-02	13,07	220,31	1,12E-02
20x10x2	1,0E-02	8,43	2,0E-02	6,53	55,08	1,12E-02
23x10x1	1,0E-02	8,59	2,3E-02	5,68	48,79	9,91E-03

25x10x2	1,0E-02	8,43	2,5E-02	5,23	44,06	1,12E-02
90x10x1	1,0E-02	8,59	9,0E-02	1,45	12,47	9,91E-03
10x6x5	6,0E-03	13,26	1,0E-02	13,07	173,33	1,16E-02
30x7x10	7,0E-03	10,25	3,0E-02	4,36	44,64	1,08E-02
40x20x10	2,0E-02	3,59	4,0E-02	3,27	11,72	1,08E-02
50x50x20	5,0E-02	1,12	5,0E-02	2,61	2,93	8,56E-03
Samario Sm1Co5						
10x5x3	5,0E-03	16,54	1,0E-02	13,07	216,21	8,46E-03
15x15x3	1,5E-02	5,51	1,5E-02	8,71	48,05	8,46E-03
20x10x2,5	1,0E-02	8,35	2,0E-02	6,53	54,57	8,36E-03
62x62x2	6,2E-02	1,36	6,2E-02	2,11	2,87	8,18E-03
20x12x5	1,2E-02	6,63	2,0E-02	6,53	43,33	8,50E-03
30x10x6	1,0E-02	7,80	3,0E-02	4,36	33,98	8,42E-03
62x62x10	6,2E-02	1,16	6,2E-02	2,11	2,44	7,92E-03
Samario Sm2Co17						
15x15x3	1,5E-02	5,51	1,5E-02	8,71	48,05	1,00E-02
20x10x2,5	1,0E-02	8,35	2,0E-02	6,53	54,57	9,89E-03
62x62x2	6,2E-02	1,36	6,2E-02	2,11	2,87	9,66E-03
20x12x5	1,2E-02	6,63	2,0E-02	6,53	43,33	1,01E-02
30x10x6	1,0E-02	7,80	3,0E-02	4,36	33,98	1,00E-02
62x62x10	6,2E-02	1,16	6,2E-02	2,11	2,44	9,47E-03
Ferrita Y10T						
4x4x2	4,0E-03	21,07	4,0E-03	32,67	688,48	1,87E-03
5x5x2	5,0E-03	16,86	5,0E-03	26,14	440,63	1,87E-03
9x5x2,5	5,0E-03	16,70	9,0E-03	14,52	242,51	1,91E-03
40x25x15	2,5E-02	2,55	4,0E-02	3,27	8,35	1,63E-03
100x100x10	1,0E-01	0,72	1,0E-02	13,07	9,37	1,81E-03
Ferrita Y30						0,00E+00
4x4x2	4,0E-03	21,07	4,0E-03	32,67	688,48	3,40E-03
5x5x2	5,0E-03	16,86	5,0E-03	26,14	440,63	3,40E-03
9x5x2,5	5,0E-03	16,70	9,0E-03	14,52	242,51	3,52E-03
40x25x15	2,5E-02	2,55	4,0E-02	3,27	8,35	3,14E-03
100x100x10	1,0E-01	0,72	1,0E-02	13,07	9,37	3,47E-03

Ferrita Y30BH						
4x4x2	4,0E-03	21,07	4,0E-03	32,67	688,48	3,53E-03
5x5x2	5,0E-03	16,86	5,0E-03	26,14	440,63	3,53E-03
9x5x2,5	5,0E-03	16,70	9,0E-03	14,52	242,51	3,62E-03
40x25x15	2,5E-02	2,55	4,0E-02	3,27	8,35	3,16E-03
100x100x10	1,0E-01	0,72	1,0E-02	13,07	9,37	3,50E-03

A la vista de los resultados existen varias posibilidades de imanes para generar la densidad de flujo necesaria, por lo que analizando el resto de variables, se ha decidido elegir el imán de neodimio N42 de 40x10x10 debido a que además de que esta cerca de generar un flujo cercano al buscado, se queda en 1T se observa que el número de imanes necesarios para cubrir toda la superficie del rotor es la más cómoda, ya que son necesarias 3 filas de imanes de 7 imanes en cada fila, lo que da una aproximación de 23 imanes en toda la superficie de un polo.

Este número de imanes por polo se ajusta a la idea de que al ser imanes estrechos, 10 mm, se podrán adherir mejor a la superficie curva del rotor que si tuvieran más anchura, con lo que además conseguimos un flujo más uniforme a lo largo del entrehierro. Este número de imanes, al tener 2 pares de polos, es decir, 4 polos, nos da un total de 92 imanes.

Estos imanes están preparados para trabajar a una temperatura de trabajo de 80°C, por lo que se estudió la posibilidad de compra de imanes con mayor temperatura de trabajo pero esto, además de que hubiera aumentado el presupuesto limitado del proyecto no se encontró oferta ni distribuidores para tal fin.

3.6.1. FUERZA CENTRIFUGA DE LOS IMANES.

En la Mecánica Clásica, la fuerza centrífuga es una fuerza ficticia que aparece cuando se describe el movimiento de un cuerpo en un sistema de referencia en rotación.

El calificativo de "centrífuga" significa que "huye del centro".

Aparentemente, la fuerza centrífuga tiende a alejar los objetos del eje de rotación.

Así pues, en este sistema, los imanes estarán sometidos a una fuerza centrífuga por estar adheridos a una superficie (rotor) que va a estar girando a una velocidad angular variable.

En general, la fuerza centrífuga asociada a una partícula de masa m que en un sistema de referencia en rotación con una velocidad angular ω y a una distancia r del eje de rotación viene dada por

$$F_c = \omega \cdot m \cdot r \text{ en Newton}$$

Para obtener el valor en kilogramos se divide el valor de la fuerza por el de la gravedad.

Tomando como datos:

$$r = 0,04975 \text{ m}$$

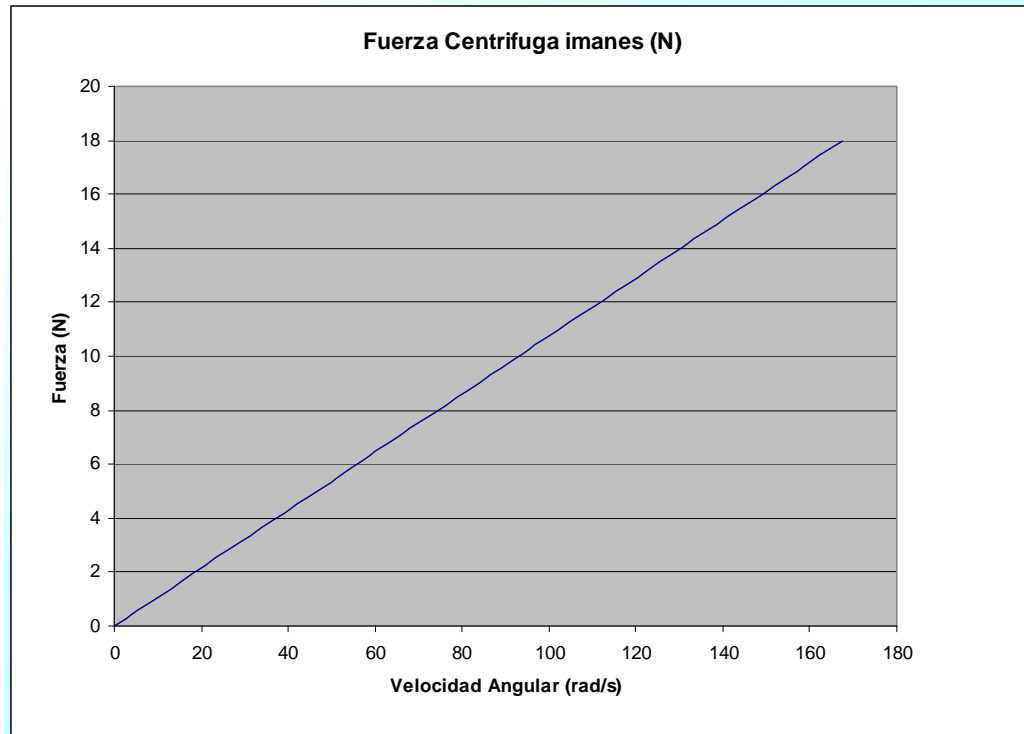
masa de un imán (características del fabricante) = 0,03 Kg.

Sabiendo que se van a colocar 72 imanes, la masa total = 2,16 Kg.

rpm	rad/s	Fuerza centrífuga de los 72 imanes	Fuerza en kg
0	0	0	0
25	2,618	0,281	2,760
50	5,236	0,563	5,520
75	7,854	0,844	8,280
100	10,472	1,125	11,039
125	13,09	1,407	13,799
150	15,708	1,688	16,559
175	18,326	1,969	19,319
200	20,944	2,251	22,079
225	23,562	2,532	24,839
250	26,18	2,813	27,599
275	28,798	3,095	30,358
300	31,416	3,376	33,118
325	34,034	3,657	35,878
350	36,652	3,939	38,638
375	39,27	4,220	41,398
400	41,888	4,501	44,158

425	44,506	4,783	46,917
450	47,124	5,064	49,677
475	49,742	5,345	52,437
500	52,36	5,627	55,197
525	54,978	5,908	57,957
550	57,596	6,189	60,717
575	60,214	6,471	63,477
600	62,832	6,752	66,236
625	65,45	7,033	68,996
650	68,068	7,315	71,756
675	70,686	7,596	74,516
700	73,304	7,877	77,276
725	75,922	8,159	80,036
750	78,54	8,440	82,796
775	81,158	8,721	85,555
800	83,776	9,003	88,315
825	86,394	9,284	91,075
850	89,012	9,565	93,835
875	91,63	9,847	96,595
900	94,248	10,128	99,355
925	96,866	10,409	102,114
950	99,484	10,691	104,874
975	102,102	10,972	107,634
1000	104,72	11,253	110,394
1025	107,338	11,535	113,154
1050	109,956	11,816	115,914
1075	112,574	12,097	118,674
1100	115,192	12,379	121,433
1125	117,81	12,660	124,193
1150	120,428	12,941	126,953
1175	123,046	13,223	129,713
1200	125,664	13,504	132,473
1225	128,282	13,785	135,233

1250	130,9	14,067	137,993
1275	133,518	14,348	140,752
1300	136,136	14,629	143,512
1325	138,754	14,911	146,272
1350	141,372	15,192	149,032
1375	143,99	15,473	151,792
1400	146,608	15,754	154,552
1425	149,226	16,036	157,311
1450	151,844	16,317	160,071
1475	154,462	16,598	162,831
1500	157,08	16,880	165,591
1525	159,698	17,161	168,351
1550	162,316	17,442	171,111
1575	164,934	17,724	173,871
1600	167,552	18,005	176,630



Por lo tanto, para una velocidad normal de 200 rpm, los imanes generarán una fuerza de 22,079 kg sobre los 4 anillos de aluminio.

En cambio, para una velocidad de 1500 rpm, velocidad a la cual se harán los ensayos de la máquina una vez modelada) la fuerza de los imanes será de 165,591.

Esta fuerza, será la que deberán de soportar los anillos de aluminio, pero los imanes, tendrán una fuerza de sujeción al rotor de 15 kilogramos (especificaciones del fabricante), a lo que habrá que sumar la acción del pegamento que se aplica a los imanes en su superficie de contacto con el rotor y la masilla que se aplicará en la superficie exterior de los imanes que reducirán esta fuerza centrífuga de forma que los esfuerzos soportados por los anillos de aluminio se verán minimizados en relación al valor inicial.

3.7. CONVERSION DEL MOTOR A GENERADOR.

3.7.1 INTRODUCCIÓN.

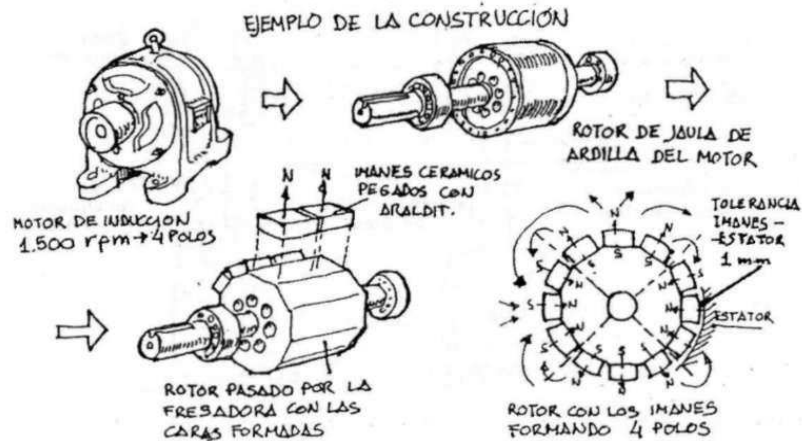
Tal y como se ha comentado en el apartado anterior se va a utilizar el bobinado del estator de ese motor para la conversión del generador. La única parte de ese motor que se va a modificar va a ser el rotor de jaula de ardilla.

En el apartado correspondiente al cálculo de los imanes se procederá a elegir que imán es más conveniente para el presente proyecto.

Cada uno de estos imanes irán pegados con un pegamento bi componente llamado araldit. Después de haber hecho los cálculos sabiendo la superficie del rotor de jaula de ardilla y después de tornearlo, y recalco después de tornearlo, porque la superficie inicial del rotor de jaula de ardilla es mayor que después de pasarlo por el torno, con la consecuencia de que caben un menor número de imanes.

Se procederá al pegado de cada uno de ellos. El pegado de estos imanes no será al azar ya que habrá que igualar el número de pares de polos del estator, que es de dos, con el número de pares de polos del rotor. Para que ésta condición se satisfaga lo que se ha hecho es la división por igual del rotor de jaula de ardilla en cuatro partes iguales.

En cada subdivisión del rotor irán pegados los imanes de tal forma que la suma del campo magnético de cada uno de ellos equivaldrá a un único imán de tamaño igual a la superficie de un cuarto del rotor.



En éste dibujo se tiene más o menos el proceso que se ha llevado a cabo para la transformación del motor de inducción en un generador síncrono de imanes permanentes.

Éste proceso se repetirá tres veces más, para formar así 4 polos magnéticos en el rotor, ya que en un generador se tiene que cumplir la condición de que el número de polos del rotor tiene que ser igual al número de polos del estator. Hay que decir que éste proceso es fácil de decirlo ya que a la hora de la verdad es complicado el pegarlos en la superficie del rotor. Se dice difícil porque la fuerza de repulsión que se ejercen dos imanes de Neodimio y de esas dimensiones es muy fuerte, impidiendo así la incrustación en la superficie a pegar.

Otro detalle importante que se debe comentar es la fuerza centrífuga que sufren los imanes cuando están girando a una cierta velocidad. Se ha llegado a la conclusión de que la suma de la fuerza centrífuga y la fuerza de repulsión sobre los propios imanes es suficiente para que a la larga éstos se despeguen pudiendo causar así alguna avería de consideración en el bobinado del estator.

Las posibles soluciones a las que se ha llegado para solucionar éste inconveniente de usar únicamente pegamento para la fijación de los imanes es la de colocar una especie de recubrimiento metálico a los imanes para evitar que se produzca la avería anteriormente citada o también la de colocar unas abrazaderas que tengan el mismo objetivo que el casquillo. Como todo en éste mundo éste tipo de cosas suele tener inconvenientes.

El primer inconveniente es que al colocar este material por encima de los imanes aumentaremos indirectamente el entrehierro de la máquina ya que la distancia que deberá recorrer el campo magnético creado por los imanes permanentes será mayor. El entrehierro que habrá ahora será la suma del entrehierro del aire más el grosor del casquillo a colocar, eso si cada material con una permeabilidad diferente siendo la del aire la permeabilidad del vacío.

El otro inconveniente es el de tener que evitar a toda costa utilizar un material para hacer el casquillo que sea ferromagnético, ya que sino el campo magnético creado por los imanes se cerrará por el casquillo en vez de por los devanados del estator impidiendo así que se induzca campo magnético en el estator con el consiguiente efecto de no crear tensión en bornes del generador.

La otra solución, colocar las abrazaderas en vez del casquillo ocurre algo similar a la colocación del casquillo. Es decir, éstas tampoco podrán ser de ningún material ferromagnético por lo anteriormente comentado. Además de eso otro inconveniente que se presenta es que al usar abrazaderas tendremos una "cabeza", que será la unión de la abrazadera que tendremos en el entrehierro, aumentando así el entrehierro y como consecuencia disminuyendo la tensión de salida.

3.7.2. OBTENCION DEL MOTOR.

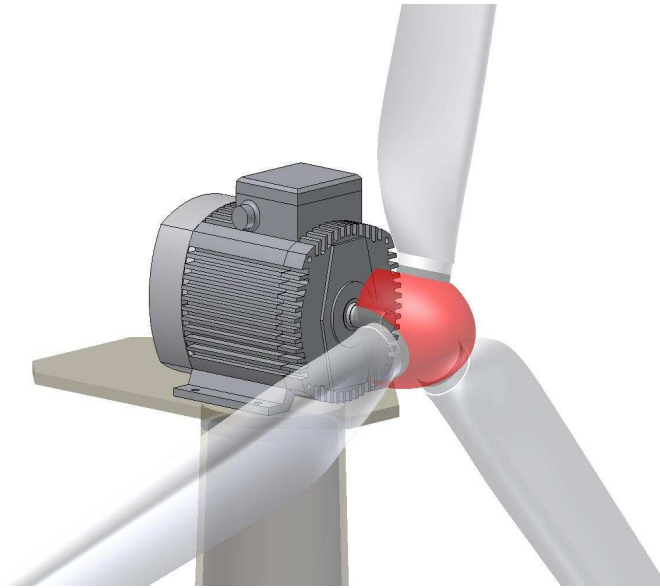
Como se ha comentado en el apartado de "Aumento de los pares de polos" en este proyecto se intenta aprovechar el devanado del estator del motor que se consigue debido a los motivos anteriormente citados.

En un primer momento se quería obtener un motor con más de 2 pares de polos y por ello se buscó en diferentes lugares como desguaces, chatarrerías etc., pero se llegó a la conclusión de no comprar ninguno.

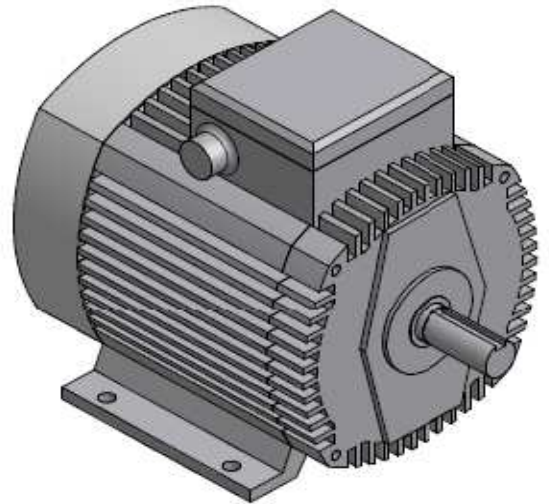
Finalmente se obtuvo un motor aparentemente en buen estado, puesto que los ensayos a los que se sometió funcionaba correctamente. Este motor es de 2 pares de polos y su antiguo fin era el de subir y bajar un ascensor.

Se trata de un motor asíncrono de jaula de ardilla de 4 Kw. de potencia. En un principio se quería un rotor de jaula y no bobinado, pues éste iba a ser sometido a una disminución del diámetro con un torno para la posterior colocación de los propios imanes permanentes.

En el siguiente dibujo se aprecia el resultado final entre el acoplamiento del motor (convertido ya en generador) y el conjunto de la eólica:



En la siguiente foto se ve el estado del motor en el momento que se consiguió. Como se observa el estado no era el más deseable ya que tiene se encontraba sucio y en estado de abandono, y una recreación tridimensional del motor utilizado para el proyecto, se puede observar su gran parecido con la realidad.



A continuación se muestra la placa de características del motor descrito con anterioridad. En ella se puede observar las siguientes características:

Marca del motor: ASEA – CES

Motor trifásico con una frecuencia de 50 Hz

MH 112-MC-4: Es la referencia del motor.

IEC 34-1 Son unas que dicen que los motores pueden funcionar a las tensiones arriba indicadas con una tolerancia de $\pm 5\%$. Para un funcionamiento al límite de tolerancia la temperatura puede superar de 10 K el límite previsto por la clase de aislamiento adoptado.

Potencia eléctrica: 4 Kw.

IP-54: El índice o grado de protección es un estándar internacional de la Comisión Electrotécnica Internacional que clasifica el nivel de protección que provee una aplicación eléctrica contra la intrusión de objetos sólidos o polvo, contactos accidentales o agua.

En este caso el primer dígito indica que el motor viene provisto de protección contra polvo la efectividad es la siguiente: La intrusión de polvo no está completamente garantizada, pero es bastante satisfactoria. También ofrece una protección completa de los contactos.

A continuación se muestra una tabla en la que se observa el significado del primer dígito.

Nivel	Protección contra objetos	Efectividad
0	-	Ninguna protección contra la intromisión de objetos
1	> 50 mm	Alguna superficie grande del cuerpo, como espalda o mano, pero no protegido contra la conexión deliberada de alguna parte del cuerpo
2	>12.5 mm	Dedos u objetos similares
3	>2.5 mm	Herramientas, cables gruesos etc
4	>1 mm	Mayoría de los cables, tortillería etc
5(k)	Polvo	La intrusión de polvo no está completamente garantizada, pero es bastante satisfactoria, protección completa de los contactos.
6(k)	Polvo fino	Ninguna penetración de polvo, protección completa de los contactos

El segundo dígito indica que será resistente frente a un chorro de agua. El agua chorreada hacia la protección del equipo desde cualquier dirección no tendrá efectos dañinos.

A continuación se adjunta la siguiente tabla en la que se ve el significado del segundo dígito:

Nivel	Protección contra:	Detalles
0	Sin protección	-
1	Goteo de agua	El goteo de agua en vertical, no causará daño alguno
2	Agua goteando inclinado 15 °	El goteo vertical de agua no causará daños en el equipo cuando el ángulo que forman es menor de 15°
3	Agua rociada	Agua que cae en cualquier ángulo superior a 60° desde la vertical no causará daños
4	Chorro de agua	El agua chorreada hacia la protección del equipo desde cualquier dirección no tendrá consecuencias malignas
5	Potente chorro de agua	El agua disipada por una boquilla hacia la protección del equipo desde cualquier dirección no tendrá efectos dañinos
6	Fuertes aguas	El agua disparada potentemente hacia la protección del equipo desde cualquier dirección no tendrá efecto
7	Inmersión a 1m	No habrá consecuencias dañinas en el equipo por inmersión a 1m de profundidad
8	Inmersión a más de 1m	No habrá daños en el equipo en una inmersión a más de 1m de profundidad

Potencia mecánica: 5.5 Cv.

Tensión de alimentación en el caso de que la conexión sea estrella: 380 V.

Intensidad por fase en el caso de que la conexión sea estrella: 10 A.

Tensión de alimentación en el caso de que la conexión sea triángulo: 220

V.

Intensidad por fase en el caso de que la conexión sea triángulo: 17.3 A.

El factor de potencia: 0.83.

Velocidad nominal del motor =1410 rpm.

Fabricado en España.



3.7.3. CONSTRUCCION GENERADOR.

Tal y como se comentará en el apartado de transformación de motor a generador únicamente se va a retocar el rotor del motor.

El rotor se convertirá en la superficie alrededor de la cual se colocaran los imanes permanentes para poder crear el campo magnético giratorio.

Se dispone de una serie de imanes permanentes con forma de paralelepípedo con las siguientes dimensiones:

- 40mm de largo.
- 10mm de ancho.
- 10mm de alto.

Las dimensiones del rotor del motor de origen son:

- 5,716 cm de radio.
- 13.069 cm de longitud.

Suponiendo que el pegamento colocado para adherir los imanes al rotor tenga un espesor de 1.5 mm habrá que disminuir el radio del rotor, mediante la ayuda de un torno, 11.5 mm.

Con las medidas del anterior párrafo se puede calcular de manera exacta el número de imanes por polo y por consiguiente el número de imanes en todo el rotor. Los cálculos realizados indican que el número de imanes en un polo es de 21 por cuatro polos en el rotor son una cantidad de 84 imanes a utilizar.

Como la fuerza de atracción y repulsión de estos imanes es tan fuerte se ha pensado en algún otro elemento a colocar para evitar que un futuro estas fuerzas sean las responsables de que se despeguen los imanes del rotor. Otro fenómeno responsable del despegue de los imanes puede ser la fuerza centrífuga, ya que ésta puede ser importante a grandes revoluciones.

Los sistemas posibles a la hora de diseñar la pieza adicional para evitar el despegue de los imanes son las siguientes:

- Impregnación de una masilla alrededor de los imanes.
- Colocación de unas abrazaderas alrededor.
- Fabricación de un cilindro de radio igual al rotor más los imanes.
- Colocación de unos anillos alrededor.
- Combinación de abrazaderas más masilla.
- Tornear el rotor con la forma de los propios imanes.
- Diseño de imanes circulares con sistema de enganche al rotor.
- Impregnación mediante alguna fibra, como la de carbono o vidrio.
- Colocación de anillos con cuñas para facilitar el montaje.
- Combinación de dos anillos unidos con varillas.

3.7.3.1 IMPREGNACION POR MASILLA.

Esta técnica consiste en la colocación de una pasta de dos componentes que al mezclarlos y compactarlos bien se comporta como una especie de cemento capaz de compactar bien los imanes al rotor. Las recomendaciones a tener en cuenta para su uso son varias, en este tipo de masillas se seca al contacto con el aire. Cada fabricante hace sus propios cálculos pero su completo secado está en torno a una media de unas 4 o 5 horas. El secado también depende de cómo se hayan amasado los dos componentes para una correcta unificación. Un síntoma de que está bien compacto que si al juntar los componentes conseguimos color homogéneo sin restos de los dos colores iniciales.

Después de un correcto secado estas masillas se pueden lijar y pulir quedando una perfecta y uniforme superficie.

El principal motivo por el que no se utilizó esta técnica es que el espesor necesario para poder compactar correctamente los imanes excedía del límite estimado, ya que mucho espesor implica mucho entrehierro lo cual se traduce en un aumento considerable de la reluctancia. Y ya se sabe que si se aumenta el nivel de reluctancia la cantidad de flujo que circulará será menor, en definitiva producirá algo menos de potencia a la salida en bornes del generador.

La gran ventaja de ésta técnica es que es muy sencillo de usar ya que no hay más que mezclar correctamente las dos sustancias. Otra cosa buena que tiene es que una vez que está seca se puede pulir la superficie casi como si se tratase de madera.

A continuación se muestra una fotografía en la que se puede observar que cuando este tipo de masilla se compra vienen los dos componentes por separado que son normalmente de esos dos colores (marrón y negro).



3.7.3.2 SUJECCION MEDIANTE ABRAZADERAS.

Esta es otra opción que se estuvo barajando a la hora de fijar los imanes. En un principio existen dos tipos de abrazaderas según su material, de plástico o de metal.

En las abrazaderas de plástico, el principal inconveniente es la colocación de la cabeza de la propia abrazadera. Se le llama cabeza de la abrazadera a la unión de un extremo con el otro, el problema de esta unión es que ocupa un preciado espacio en el entrehierro aumentándolo y produciéndose pérdidas.

Una opción es colocar la abrazadera al revés para que la cabeza esté hacia abajo. Se dice poner la cabeza hacia abajo porque esta iría entre imanes que previamente se habrían colocado con separación, el problema de hacer esto es que apretar una abrazadera al revés es difícil por no decir imposible. A continuación se muestra una fotografía en la que se observa más fácilmente las partes de la abrazadera.



En las abrazaderas metálicas ocurre algo parecido, el gran problema de éstas es que deben ser de material no ferromagnético puesto que si no fuera así las líneas de campo creadas por el aerogenerador se cerrarían por las abrazaderas y no por el estator. Existen materiales no ferromagnéticos como por ejemplo el aluminio, bronce, platino, titanio, oro

Aquí existe el mismo problema que con la abrazadera de plástico, y es el punto de unión de los extremos de la abrazadera. Como se ha dicho anteriormente el problema se encuentra en la colocación de la cabeza de la unión, que en este caso es con tornillo lo cual es todavía más ancho lo cual aumentaría más el entrehierro. La parte positiva de utilizar abrazaderas de metal es que estas tienen más dureza y aguantarían mejor la fuerza centrífuga de los imanes.



3.7.3.3 CILINDRO DE RADIO IGUAL AL ROTOR MÁS LOS IMANES.

El sistema constaría de un cilindro metálico o de plástico con diámetro interior igual a la suma del radio del rotor más el grosor de los imanes. Este cilindro se colocaría una vez pegados todos los imanes en el rotor y su función sería compactar los imanes al rotor además de evitar que se despeguen a altas velocidades.

Una vez más el material de este cilindro deberá de ser no ferromagnético. Los motivos por los que se descartó este sistema fue porque su fabricación es cara, ya que no venden cilindros normalizados de la medida que se necesita,

otra forma de fabricar este cilindro era a partir de una chapa de anchura igual a la largura del rotor y darle forma de cilindro soldando los extremos.

En la soldadura radicaba su dificultad, ya que ésta debía de ser de aluminio y soldar en aluminio resulta caro y complicado, además de que no iba a quedar un acabado correcto.

Otra opción era la de torneear un bloque con el diámetro que se necesitaba pero el problema estaba que resulta caro y no era por su complejidad o por el coste del bloque sino porque la mano de obra iba a ser elevada ya que la cantidad de material a quitar iba a ser enorme.



3.7.3.4 Impregnación mediante alguna fibra, como la de carbono o vidrio.

La idea principal es acoplar los imanes al rotor mediante alguna técnica ya comentada, ya sea haciendo ranuras al rotor, usando algún pegamento bi componente, o cualquier otra forma.

Una vez que se realizara este paso de acople de los imanes al rotor, habría que colocar la masa de fibra de carbono o en su defecto de vidrio, para compactar todo el conjunto, la ventaja del uso de ésta técnica reside en la ligereza y dureza de la fibra de carbono o de vidrio, además de que los dos son materiales no ferromagnéticos puesto que son fibras y no son ningún tipo de metal.

El inconveniente de esto sería el trabajar con fibras de este tipo ya que para manejar esto y darle la forma exacta a la del rotor más los imanes, haría falta algún molde exacto para fabricar correctamente con esas medidas. Otro inconveniente de el uso de esto es que tanto la fibra de carbono como la de vidrio tiene muchísima dureza en un sentido pero si ejercemos algo de fuerza sobre otro sentido se deshilara son mucha facilidad impidiendo así que la fuerza centrífuga no afecte a los imanes.

En las siguientes fotografías se aprecian materiales de fibra de vidrio y carbono, en la foto de la izquierda corresponde a fibra de carbono y la foto de la derecha a la de vidrio.

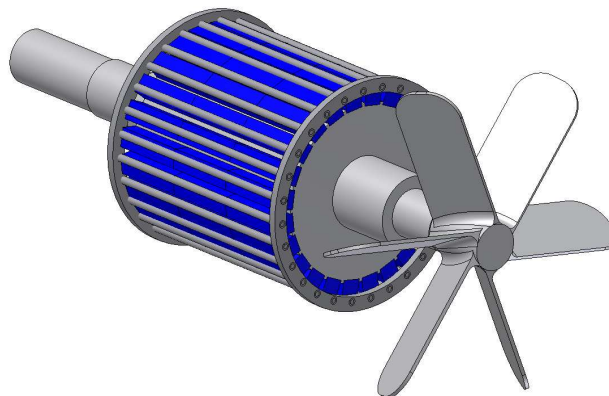
3.7.3.5 Combinación de dos anillos unidos con varillas.

Esta otra técnica está formada por dos platos colocados en los laterales o paredes del rotor, unidos entre sí con unas varillas. Todo el conjunto del sistema formado por los platos y varillas son de materiales no ferromagnético.

Habría tantas varillas como filas de imanes tenga el rotor puesto que estas varillas están colocadas entre las filas de los imanes. Hasta ahí parece todo muy fácil pero el problema está en que la separación entre las filas de los imanes es tan pequeña que no existen normalizados varillas de esas características, además en el caso en que existieran varillas de ese tamaño éstas deberían de ser de aluminio lo cual nos dice que su resistencia esta limitada, ya que es bastante blando, y posiblemente no aguantaría la fuerza centrífuga.

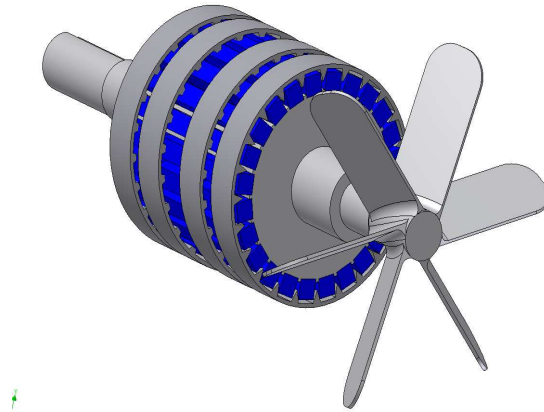
Otro problema que se aprecia es la unión de las varillas con los platos. Esta unión deberá ser mediante soldadura de aluminio ya que la corriente es mediante electrodos de material ferromagnético, y la soldadura por ejemplo con aluminio es complicada. Soldar elementos tan pequeños como las varillas es difícil ya que la propia soldadura puede agujerearlas impidiendo así que hagan su función de compactar los imanes con el rotor.

A continuación se muestra una fotografía de lo que podía ser el sistema de plato-varillas:



3.7.3.6 Colocación de anillos para facilitar el montaje.

Tal y como muestra la figura, la preferencia de éste sistema de sujeción de imanes es la de un anillo con unas cuñas. La misión de estas cuñas es la de separar físicamente cada imán para que a la hora de realizar el montaje de los imanes sobre el rotor resulte más fácil, ya que tanto la fuerza de repulsión como la de atracción es increíblemente fuerte, impidiendo la colocación de los imanes sobre el rotor sin ningún sistema.



Este anillo debía de cumplir unas especificaciones técnicas:

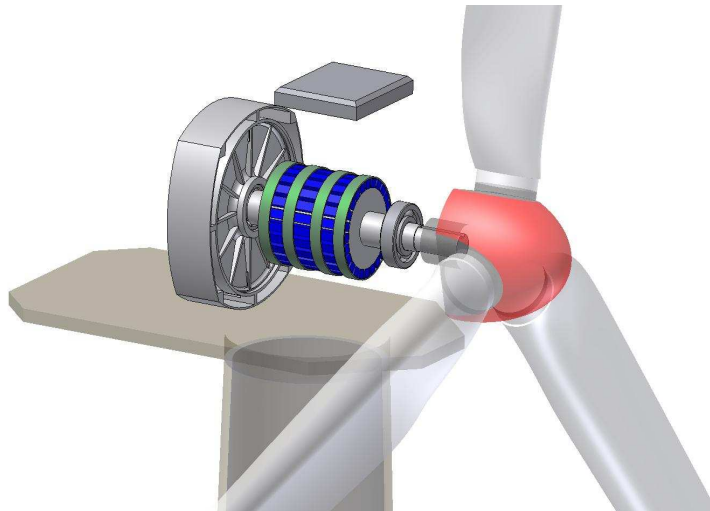
- El material del anillo debía de ser no ferromagnético, ya que si no las líneas de campo magnético creadas por los imanes se cerrarían en el anillo y no sobre el estator con el consiguiente efecto de que no se generaría nada en bornes del estator. Ejemplos de materiales no ferromagnéticos serían el bronce, platino, aluminio, todo tipo de fibras (carbono, vidrio) y plásticos.
- Debe de ser lo más fino posible, ya que cuanto más grueso fuese éste más entrehierro habría en el generador, disminuyendo el valor del campo magnético en el estator y reduciendo también la potencia extraída en bornes del generador.
- Las cuñas que separan cada imán debían de ser muy estrechas ya que se calculó en un principio que el espacio existente en cada imán iba a ser minúsculo; el espacio del que se habla era de unos 2mm en su punto más alto.
- El acabado de la pieza tiene que ser perfecto, es decir sin ninguna rebaba ni imperfección ya que los imanes iban a entrar en los huecos casi sin holgura aunque se habían dejado unas tolerancias de margen. Se tenían dos opciones para realizar esta pieza, mediante corte por chorro de agua o mediante láser. La máquina de corte por láser no era un sistema válido a utilizar ya que éste método de corte deja alguna imperfección en su acabado, se optó entonces por corte mediante chorro de agua.

Los motivos por los que se descartó el uso del anillo con las cuñas fue principalmente el precio del corte por chorro de agua. Se dice que esta técnica de corte es cara por que la pieza era complicada y debía de ser muy precisa. Otro hándicap a tener en cuenta con el corte de chorro de agua es que en Navarra no existen apenas talleres que se encarguen de cortar por esta técnica, por lo cual había que salir fuera de Navarra para la construcción de esta pieza elevándose el precio.

3.7.3.7 COLOCACIÓN DE UNOS ANILLOS SIN CUÑAS ALREDEDOR.

Esta técnica es bastante parecida a la del cilindro con la ventaja de que el volumen de material utilizado es mucho menor ya que no se va a cubrir toda la superficie de los imanes. Esta técnica es parecida a la finalmente adoptada aunque con algún complemento. El inconveniente de utilizar este tipo de anillos es que deben ser del mismo diámetro que la suma del radio del rotor y el grosor de los imanes. El material también tiene que ser no ferromagnético.

La siguiente imagen muestra como quedarían los anillos alrededor del rotor y los imanes:



3.7.3.8 SOLUCIÓN ADOPTADA. COMBINACIÓN DE ANILLOS MÁS MASILLA.

Esta técnica, que finalmente fue la que se desarrolló, se basa en la misma que la anterior pero con la adición de la masilla. Aunque parezca extraño, el entrehierro del generador va a ser el mismo que si solo colocáramos los anillos, ya que la masilla se ha colocado en el espacio que quedaba entre los anillos, aprovechando así ese espacio que se quedaría libre.

Se trata de colocar esta masilla hasta la altura de los anillos quedando así una superficie compacta y dura.

Lo bueno de utilizar esta técnica frente a la del cilindro es que el material a utilizar va a ser menor con el consiguiente efecto en la disminución de peso en el rotor lo cual puede ser positivo para el arranque del aerogenerador.



3.8. TORNEADO DEL ROTOR.

3.8.1. INTRODUCCIÓN.

Una vez elegida la forma de sujeción de los imanes y los propios imanes, se dispone ya de medidas con las que afrontar el proceso de mecanizado del rotor en su conversión a generador, ya que las diferentes posibilidades influirán en el desarrollo del proyecto e incluso en su efectividad final como generador. Es en este punto cuando surge la duda de qué mecanizado adoptar de entre las siguientes posibilidades.

3.8.1.1 CON LA FORMA DE LOS IMANES.

Se puede decir que esto se aproxima a la sistema idóneo para la fijación de los imanes, ya que crear cavidades con la forma exacta de los imanes sería bueno para la colocación de los mismos, de esta forma no se necesitaría ningún tipo de pegamento porque irían a presión. Un problema a esta técnica es que no hay ningún elemento que impida que los imanes salgan fuera de las cavidades por las fuerzas centrífugas, entonces se debería de colocar unos anillos para hacer ese papel de compactar, con lo que habría que torneear un poco el rotor para la colocación de los anillos.

El inconveniente de esta técnica es la complejidad de hacer las cavidades ya que tienen que ser casi perfectas para los propios imanes, porque éstos una vez dentro de las cavidades tenderán a girar, por acción de los campos magnéticos, para acercarse a los imanes que hay en las filas más cercanas. Las ventajas son:

- No se necesita pegamento.
- El entrehierro seguiría siendo el del motor, puesto que no se tornearía el rotor.
- Facilidad en la colocación de los imanes.
- Si las cavidades están correctamente realizadas no haría falta pegamento.

3.8.1.2 DISEÑO DE IMANES CURVOS CON SISTEMA DE ENGANCHE AL ROTOR.

Si se ha dicho que el anterior sistema era casi perfecto este se puede decir que es el mejor de todos ya que no haría falta hacer nada más que hacer las guías en el rotor. El problema de hacer las guías es que se requiere tanto de un torneado y fresado del rotor como de los propios imanes.

En este sistema no harían falta ni si quiera las abrazaderas puesto que las guías sustituirían a éstas impidiendo que por la fuerza centrífuga los imanes vayan a parar al estator produciendo así alguna avería.

3.8.1.3 AGUJEROS AXIALES

Este sistema consiste en practicar unos agujeros longitudinales en el rotor. Dentro de estos agujeros irán alojados unos cilindros semi huecos en los que se introducirán los imanes.

Se debería conseguir unos cilindros con una sección interior con forma cuadrada de 10 por 10 mm... Lógicamente conseguir una sección así facilitará el trabajo a la hora de meter los imanes al rotor ya que si esta sección fuese circular éstos tenderían a girar en el cilindro anulando los campos magnéticos e inutilizando el generador. Las ventajas que ofrece éste sistema son bastantes ya que si se realizara no haría falta torneear el rotor, ni el uso de abrazaderas para evitar que la fuerza centrífuga haga estragos, ni pegamento para fijar los imanes al rotor etc.

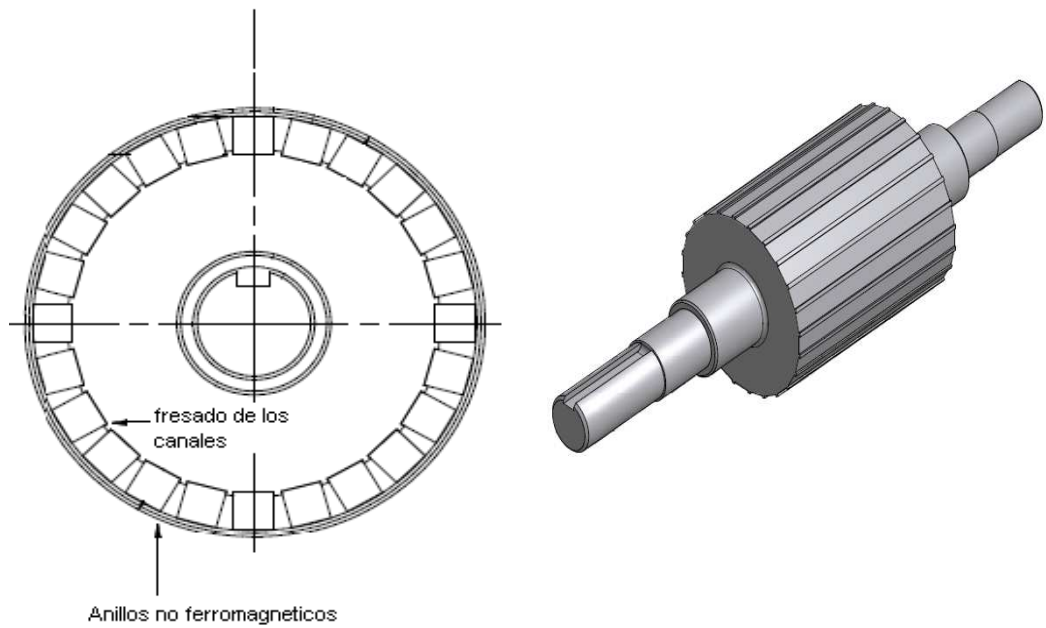
Los motivos por los que no se realizaron este sistema fueron los siguientes:

- Es prácticamente imposible hacer unos agujeros longitudinales al rotor tan largos sin que se desvíen e impidan que se pueda introducir los cilindros en los agujeros, la maquina que se encargaría de hacer esos agujeros debería ser grande y con buenas y calibradas fijaciones para sujetar el rotor lo más vertical posible.
- Los cilindros en cuestión deben ser de material no ferromagnético para no interferir en los campos magnéticos, en el caso de que fuesen de aluminio por ejemplo serian algo débiles ya que éste es un material más o menos blando
- Es difícil conseguir unos cilindros con esa sección cuadrada y esas dimensiones.
- Al hacer los agujeros lo más cercanos entre ellos y entre la propia superficie del rotor, esas paredes de hierro dulce se hacen frágiles pudiéndose romper con, por ejemplo, un exceso de viento en el aerogenerador.
- Para finalizar con los inconvenientes tenemos que la fracción de material del rotor que se queda por encima de los imanes es ferromagnético ya que el material constituido por el rotor es de hierro dulce con buena permeabilidad magnética.

3.8.1.4 SOLUCIÓN ADOPTADA. CANALES LONGITUDINALES

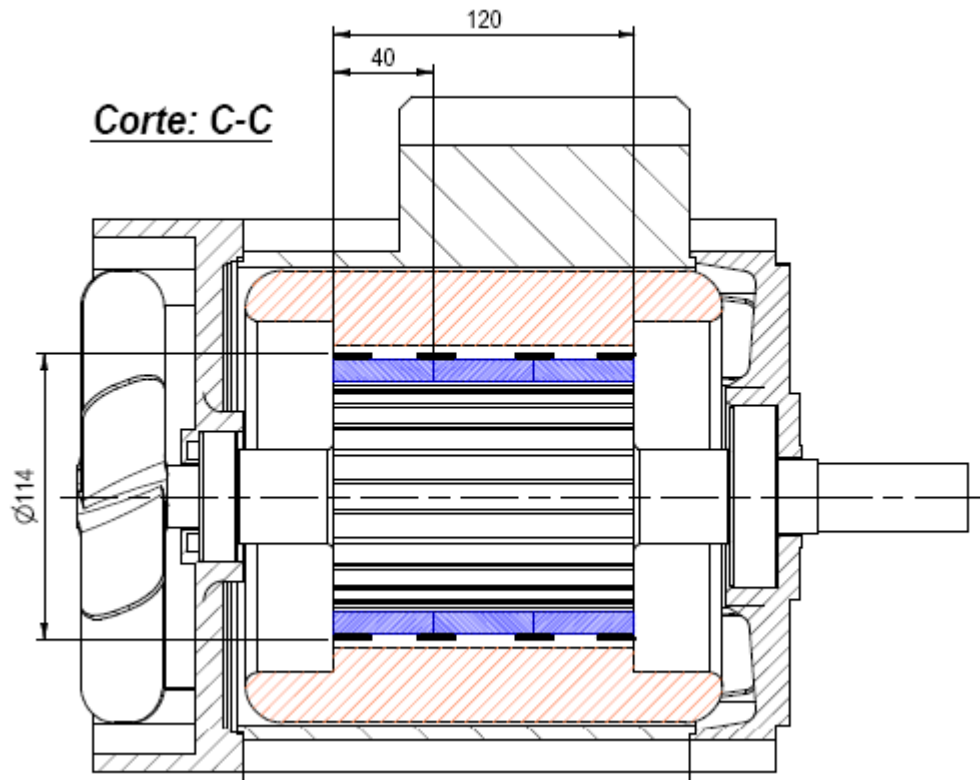
Finalmente se optó por crear unos canales longitudinales en el rotor de la anchura de los imanes.

Este sistema consiste en torneear el rotor para posteriormente mediante una fresadora, crear 24 canales longitudinales, de manera que los imanes dispongan de un lugar fijo y queden ordenados en la superficie consiguiendo de esta manera, una colocación más sencilla, ya que la fuerza de atracción-repulsión impediría en caso de no incluir ningún sistema, la correcta colocación y ordenada de los imanes, y a la vez se consigue la creación de un flujo más uniforme en el entrehierro. A continuación se muestran los planos finales de los anillos y del torneado del rotor.



En el dibujo que se muestra a continuación se observa el diseño que se realizó antes de fabricarlo, en el dibujo se pueden observar:

1. los cuatro anillos colocados en el rotor, de color negro.
2. los imanes a lo largo del rotor, de color azul.
3. Se ha dibujado las ranuras en el rotor donde van los imanes colocados.



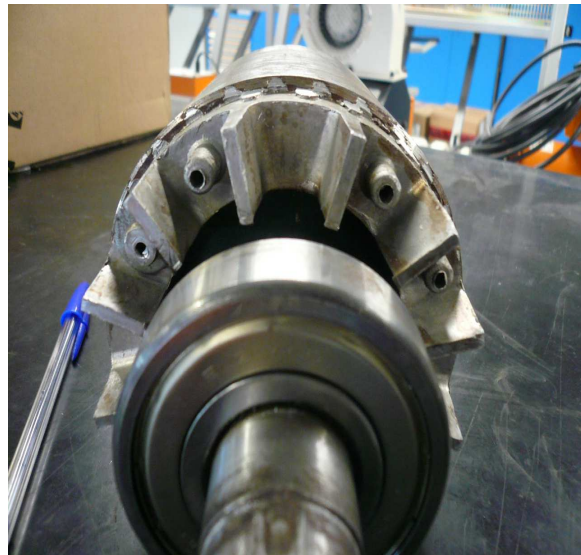
3.9. PROCESO DE CREACIÓN.

3.9.1. INTRODUCCIÓN.

A continuación se describe el proceso de transformación del rotor original de jaula de ardilla hasta que, una vez colocados los imanes y los anillos, se convierte en un rotor de imanes permanentes.

3.9.2. TORNEADO Y FRESADO.

Una vez extraído el rotor del motor original, se procede al rebaje del diámetro en un torno.



Posteriormente realizar los canales con una fresadora en un taller de mecanizado. El resultado es el siguiente:



Una vez se dispone del rotor, se marcan las ranuras que serán polo norte y las del polo sur con un rotulador, 6 ranuras para cada polo, y de manera análoga habrá que proceder con los imanes, hay que observar que la cara del imán que se marca es la correcta ya que al ser las 4 caras iguales, tanto las correspondientes a los polos como las laterales inducirán campo magnético.

3.9.3. ADHESIÓN DE LOS IMANES.

Para el pegado de los imanes se procedió de la siguiente manera. Se comenzó por la fila central de las 3 que existen, se marca la posición en la que deben de quedar los imanes para que no queden desalineados entre ellos y con las otras filas de imanes, se mezcla el pegamento bi componente araldit y se coloca una fina capa en la zona en la que ira colocado.

En lugar de ir colocando todos los imanes de manera continuada, se procede de manera alterna, esto es, dejando un hueco entre un imán y otro. Este proceder resulta útil al principio para ir dando cuerpo al nuevo rotor y ya que dos imanes contiguos se atraen entre si, se dará el caso de que el pegado no resultaría apropiado ya que se inclinarían hacia el imán contiguo en caso de ser un cambio de polo o se repelería en caso de ser ambos del mismo polo. Hay que tener en cuenta que este tipo de pegamentos necesitan de unas horas de secado en un entorno seco, en este caso 12 horas, por lo que hay que prestar atención a que los imanes están correctamente colocados. Esto provoca un lento proceder pero necesario para conseguir el flujo deseado en el entrehierro.

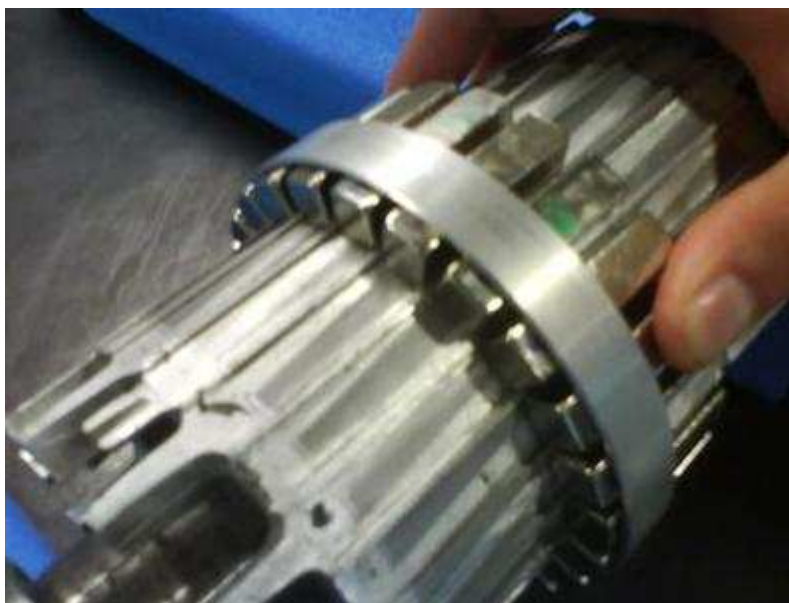
En la siguiente imagen se ilustra el rotor con las nuevas ranuras y el comienzo del proceso de pegado de imanes en la fila central.



Con una vuelta de imanes alternos ya colocados:



Una vez que se tiene una vuelta completa de imanes alternos, hay que colocar los que deben de ir colocados entre ellos, para eso, debido a la repulsión antes descrita entre imanes, encontramos la primera utilidad de los anillos. Debido a que con la mitad de imanes de una fila ya colocados y repartidos por toda la circunferencia el rotor ya tiene el diámetro equivalente al diámetro interior del anillo, este ya puede sujetarse por si solo. Esto resulta de gran ayuda ya que con el anillo colocado, la introducción del imán en el hueco correspondiente no será problemático al tener solo posibilidad de desplazamiento longitudinal, ya que cualquier movimiento transversal queda impedido por el anillo y las paredes de los canales.



Llegados a este, punto el proceso se ha de realizar con las filas exteriores. Aquí surge una nueva complicación, el imán a colocar, se ve repelido hacia "atrás" por el imán de la fila central, ya que son del mismo polo. Las tres filas de imanes han de quedar juntas de tal manera que el flujo que creen una vez montado sea uniforme, de lo contrario habría huecos que provocarían un incorrecto voltaje y por lo tanto el diseño no hubiera sido el óptimo.

Por esto, y ya que en ambas filas exteriores iba a suceder lo mismo, se decidió realizar ambas filas simultáneamente, ahorrando de esta manera tiempo. Para ello, se hizo uso de sargentos de tal manera que mantuviera los imanes de las tres filas unidos mientras el pegamento se secaba. Aquí no se pudo proceder al pegado de manera alterna como en la fila central debido a que los sargentos se molestaban y cualquier toque implicaba que las partes metálicas del sargento fueran atraídas por los imanes ya colocados con el consiguiente peligro de rotura y la inutilidad del fin al que estaba destinado el sargento de mantener los imanes en su posición hasta el secado del pegamento. Esta situación comprometida, obliga a prestar atención también al modo en el que se va a dejar el rotor durante el proceso de secado, ya que no se puede dejar durante este proceso de manera inestable ni apoyado sobre el cuerpo del rotor, en el proceso de este proyecto se dejó apoyado sobre el eje de tal manera que el cuerpo quedaba fuera de cualquier fuerza exterior que pudiera ser ejercida en los imanes si exceptuamos la señalada del sargento.



Una vez que varios imanes alrededor de la circunferencia estaban en su posición, fue necesario proceder de manera análoga a como se procedió con la fila central, es decir, ayudándose de los anillos. Conforme más anillos se van colocando, la fuerza de repulsión entre ellos es mayor con lo que los imanes que aun falta por colocar se convierte en una tarea difícil. Un imán "norte" que ha de

colocarse entre otros dos imanes norte, es repelido hacia “atrás” de tal manera que es capaz de salir del cuerpo del rotor hasta un lugar donde ya no están los anillos en el que poder girar 180 grados y volver a colocarse en el hueco correspondiente, con la consecuente molestia de sacar el imán incorrecto del lugar en el que ha quedado, y donde ahora el flujo magnético creado por los imanes del alrededor favorece esa ubicación, limpiarlo de pegamento, y reiniciar el procedimiento.

En el caso de esto ocurra en un cambio de polo, el cuidado que hay que tener es parecido. Además de la posibilidad de salir repelido hacia atrás, en estos cambios de polo aparece una fuerza transversal del imán de uno de los lados, que tendrá la misma polaridad que el imán a colocar, hacia el lado contrario, esta será doble debido a que el imán que se esta colocando ayudara en ese sentido, pero el imane del lado contrario, al ser el polo opuesto, intenta atraer al imán que se esta colocando hacia el. Esto provoca, que casi de manera imperceptible y a pesar de la ayuda de los anillos, una pequeña porción de imán quede levantada. Como es obvio, esto es algo que hay que evitar ya que como se ha comentado anteriormente cualquier anomalía puede provocar que el flujo no sea el requerido, en este caso, este levantamiento se soluciona colocando además de los sargentos longitudinales que mantienen a los nuevos imanes en su posición, con un sargento transversal que mantenga el imán completamente asentado en la superficie del rotor durante el proceso de secado del pegamento. Este nuevo sargento transversal es muy peligroso para la integridad de los imanes, ya que sus partes metálicas quedan más expuestas al campo magnético que los longitudinales pudiendo provocar el golpeo innecesario con la consecuente molestia en caso de romperse algún imán.

En el transcurso de este proceso, se inyecta una pequeña cantidad de pegamento en las ranuras que iban quedando entre dos imanes contiguos a lo largo de las tres filas de imanes, ya que este pegamento al secarse se hace sólido y servía de pequeño extra de pared, no ferromagnética, de manera que se disminuía la posibilidad de que cualquier imane se pudiera inclinar hacia el imán contiguo en el caso de que hubiera quedado algún pequeño lugar con menos pegamento del necesario.

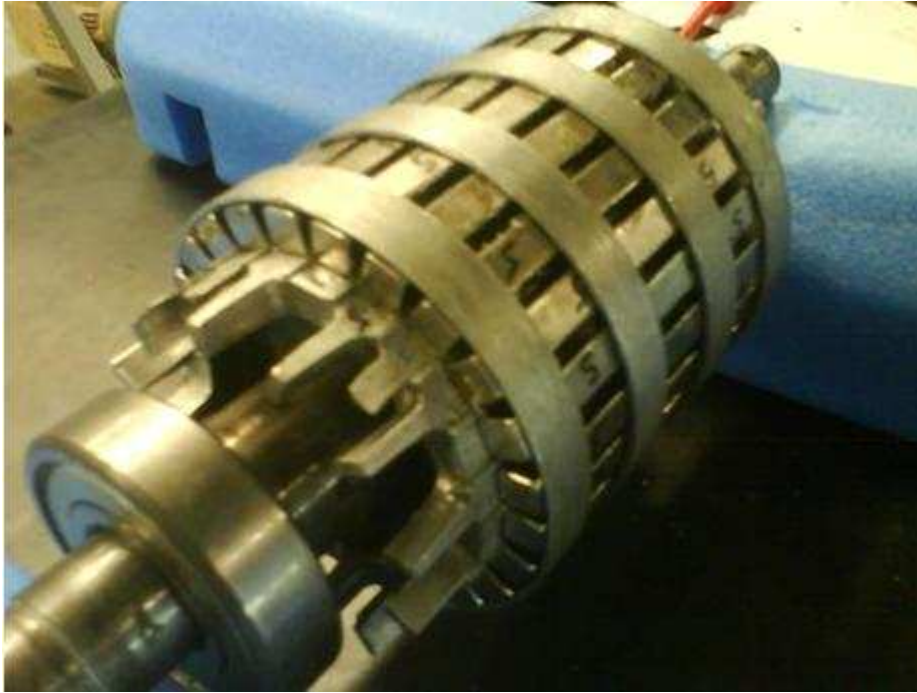
Una vez que todos los imanes han sido colocados y están asegurados en su lugar correspondiente, se quitaron los anillos para proceder a un pequeño lavado de posibles restos de pegamento. El rotor sin los anillos quedó así:



En perspectiva:



Una vez limpiados los anillos se vuelven a colocar en su lugar:



Para conseguir mayor consistencia en el cuerpo del rotor, se extendió en los huecos que habían quedado una masilla bi componente que se endurece creando una masa compacta.



Esta masilla, una vez endurecida, se puede lijar de manera que quede uniforme.

En este caso se consideró oportuno, gracias a la posibilidad de disponer de un torno, de tornearse el rotor resultante de la anterior fotografía 0,8 mm para así evitar la posibilidad de problemas que hubieran podido ocasionar que

cualquier punto de la masilla o de los anillos más elevado de lo diseñado hubiera podido rozar con el estator una vez introducido nuevamente el rotor en el motor, con el consiguiente problema que se hubiera generado.

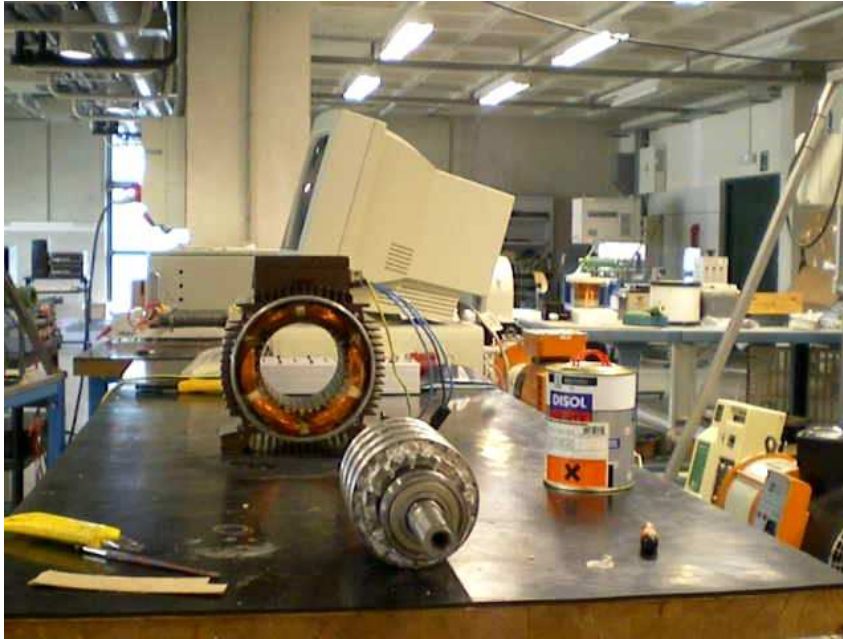


El resultado final del nuevo torneado es el siguiente:

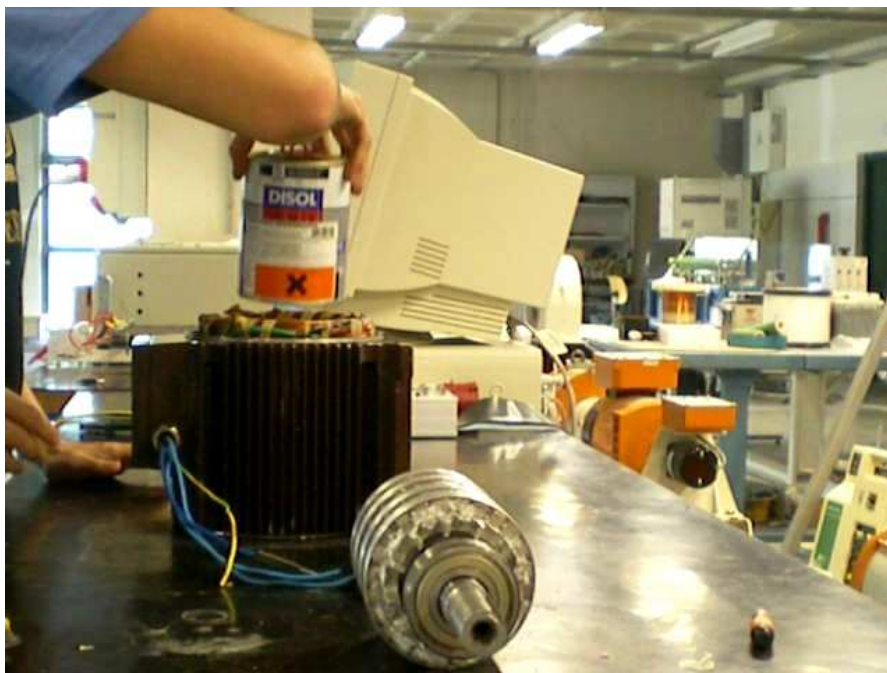


Finalmente, con el rotor ya finalizado, solo queda la introducción en el estator. Este proceso requiere de mucho cuidado, ya que una incorrecta posición

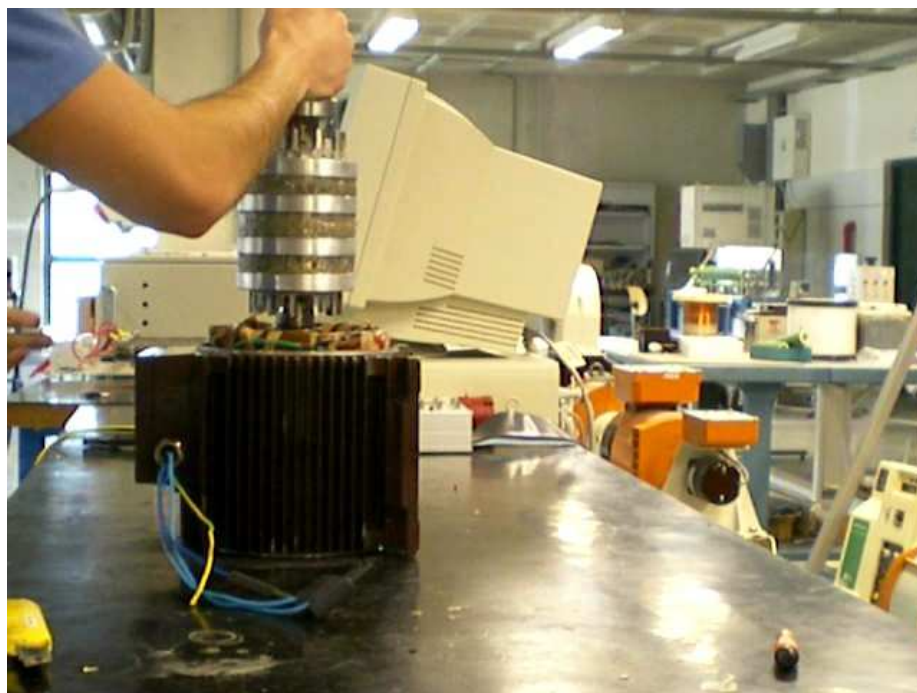
de las manos del manipulador en este punto puede provocar un desagradable incidente, pudiendo llegar a ser amputado algún dedo en esta maniobra.



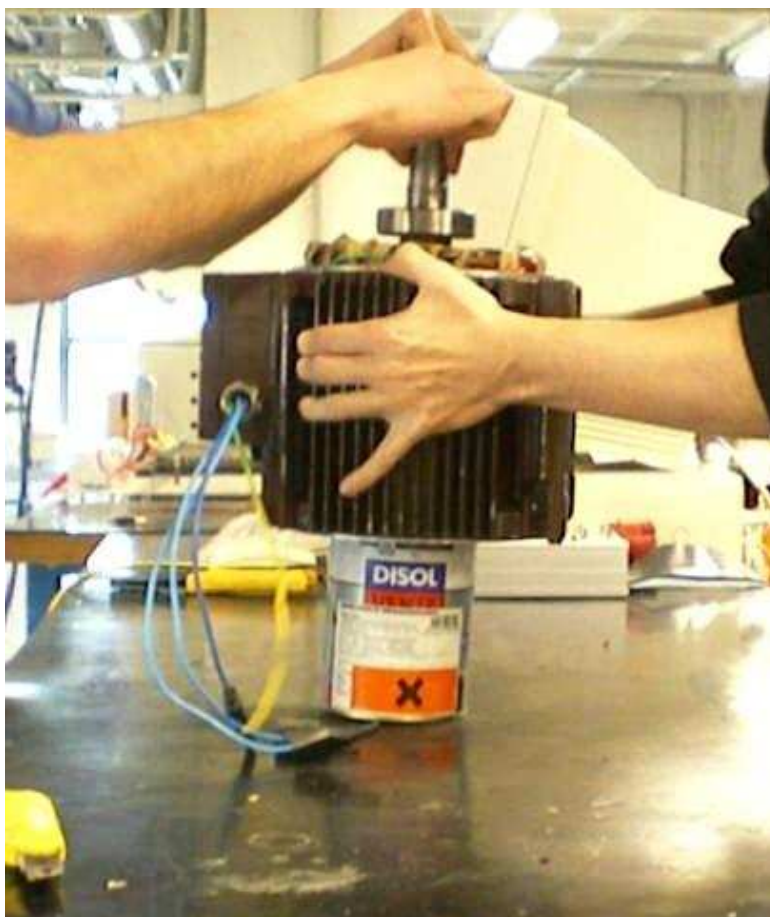
Para esto se optó por colocar el estator en una mesa en posición vertical e introducir dentro del estator una lata (cuanta más alta mejor).



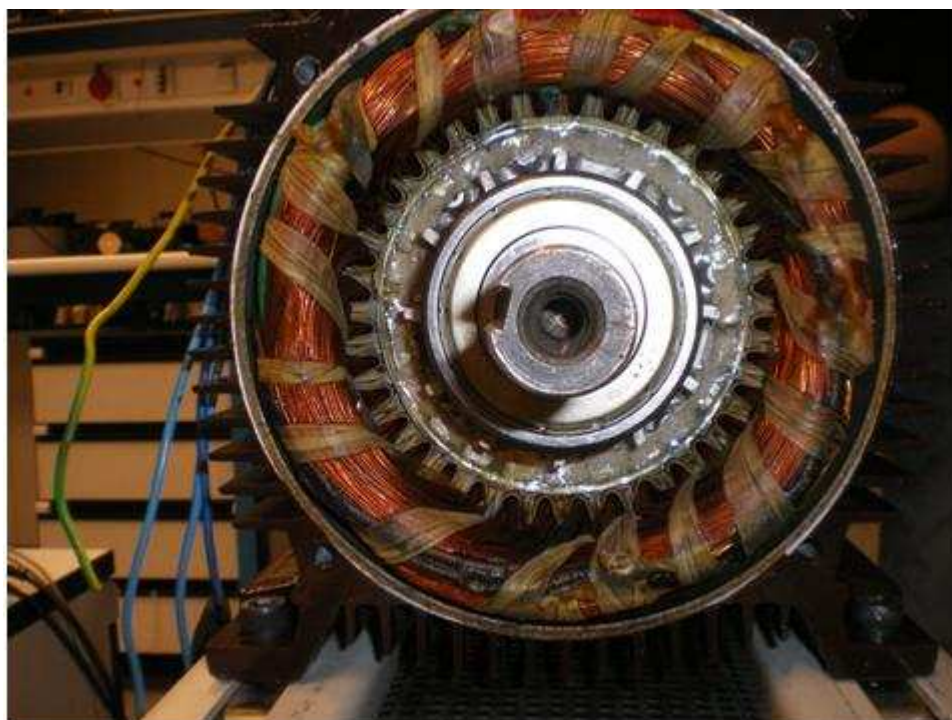
Llegados a este punto se sitúa el rotor, también en posición vertical, apoyado sobre la lata. Así quedan alineados el hueco del estator con el rotor y se puede, lentamente, levantar el estator de la mesa en dirección hacia el rotor.



Llega un momento en el que el estator sube por si solo hasta alinearse con el rotor impulsado por la fuerza de los imanes.



Una vez finalizado el proceso el resultado obtenido es el siguiente:



Para finalizar, solo quedará colocar las tapas del motor, y proceder a su montaje sobre una bancada para realizar los ensayos pertinentes.

3.10. CÁLCULOS TEÓRICOS EN VACÍO.

A continuación se describe el análisis teórico del ensayo en vacío que se le ha realizado a la máquina anteriormente descrita.

Se ha considerado una máquina ideal con las siguientes hipótesis:

- Simetría cilíndrica perfecta.
- Se han despreciado las ranuras del rotor.
- Permeabilidad del material ferromagnético infinita. Por lo tanto no existe saturación del material.
- Los bobinados del estator se consideran puntuales.

Los datos y medidas referentes a la máquina que serán necesarios para realizar los cálculos teóricos y los de los imanes ya seleccionados (40x10x10) son:

- Campo coercitivo, H_c : 91.000 Av
- Densidad de flujo remanente, B_r : 1.305 T
- Espesor del imán, l_m : 0.01 m
- Sección de los imanes, S_m :

$$\frac{40}{1000} \cdot \frac{10}{1000} \cdot 72 = 0,0288m^2$$

- Espesor del entrehierro, g : 0,0026m
- Sección del entrehierro, S_g :

$$4 \cdot \pi \cdot r \cdot l = 4 \cdot \pi \cdot \frac{54,75}{1000} \cdot \frac{120}{1000} = 0,04218m^2$$

Conocidas las hipótesis de cálculo y los datos necesarios se procede a calcular la densidad de flujo en el entrehierro y la tensión inducida en los devanados.

3.10.1. DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO EN EL ENTREHIERRO:

En un ensayo en vacío, por los devanados del estator no circulará corriente, es decir el campo magnético será creado en el rotor bien por otro devanado o bien como es este caso, por imanes permanentes.

3.10.2. CÁLCULOS:

Una vez Utilizando la ley de Ampere aplicada a un imán permanente se obtiene:

$$\oint H \, dl = i_{\text{neta}} = 0$$

$$0 = H_m \cdot l_m + H_g \cdot g$$

Las expresiones de las densidades de flujo magnético en el entrehierro e imán son:

Para el entrehierro:

$$B_g = \mu_0 \cdot H_g$$

Para el imán:

$$B_m = B_r \left(1 + \frac{H_m}{H_c} \right)$$

Donde:

B_g: Densidad de flujo en el entrehierro

B_m: Densidad de flujo del imán

μ₀: Permeabilidad del aire

En este punto se tienen en cuenta varias consideraciones que difieren a las realizadas en el apartado correspondiente al cálculo de los imanes como son: que la B en el entrehierro no es igual a la B del imán, y que las secciones del entrehierro y de los imanes tampoco son iguales.

Así pues, por ser las secciones del entrehierro y del imán distintas, entonces:

$$B_g \cdot S_g = B_m \cdot S_m$$

$$B_m = \frac{B_g \cdot S_g}{S_m}$$

Sustituyendo en la ley de Ampere se obtiene

$$0 = H_m \cdot l_m + H_g \cdot g$$

Sustituyendo Bim:

$$\frac{B_g \cdot S_g}{S_m} = B_r + \frac{H_m}{H_c} \cdot B_r$$

Sustituyendo Him:

$$\frac{B_g \cdot S_g}{S_m} = B_r + \frac{\frac{-H_g}{l_m} \cdot g}{H_c} \cdot B_r$$

Sustituyendo Hg:

$$\frac{B_g \cdot S_g}{S_m} = B_r + \frac{\frac{-B_g}{\mu_0} \cdot g}{H_c} \cdot B_r$$

$$\frac{B_g \cdot S_g}{S_m} = B_r + \frac{B_g \cdot g}{H_c \cdot \mu_0 \cdot l_m} \cdot B_r$$

Sacando factor común a Bg:

$$B_g \left(\frac{S_g}{S_m} + \frac{g \cdot B_r}{H_c \cdot \mu_0 \cdot l_m} \right) = B_r$$

$$B_g = \frac{B_r}{\left(\frac{g \cdot B_r}{H_c \cdot \mu_0 \cdot l_m} + \frac{S_g}{S_m} \right)} = \frac{1,305}{\frac{(0,0026) \cdot (1,305)}{(9,1 \cdot 10^5) \cdot (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) \cdot (0,01)} + \frac{(0,04128)}{(0,0288)}} = 0,7543T$$

3.10.3. CÁLCULO DEL PUNTO DE OPERACIÓN.

Una vez con el rotor en su forma final, ya conocemos las medidas finales y por lo tanto se puede proceder a calcular el punto de operación en el cual, la geometría de diseño es óptima si los imanes trabajan en su punto máximo de operación (HB) máx. Para determinarlo se hace la intersección de las curvas de magnetización del tipo de imán a utilizar y la curva de carga.

Utilizando las formulas del apartado anterior, se obtienen las dos formulas necesarias para calcular el punto de operación. Este punto de operación se puede representar de dos maneras, una referida al imán y otra al entrehierro.

Las dos formulas que se necesitan son:

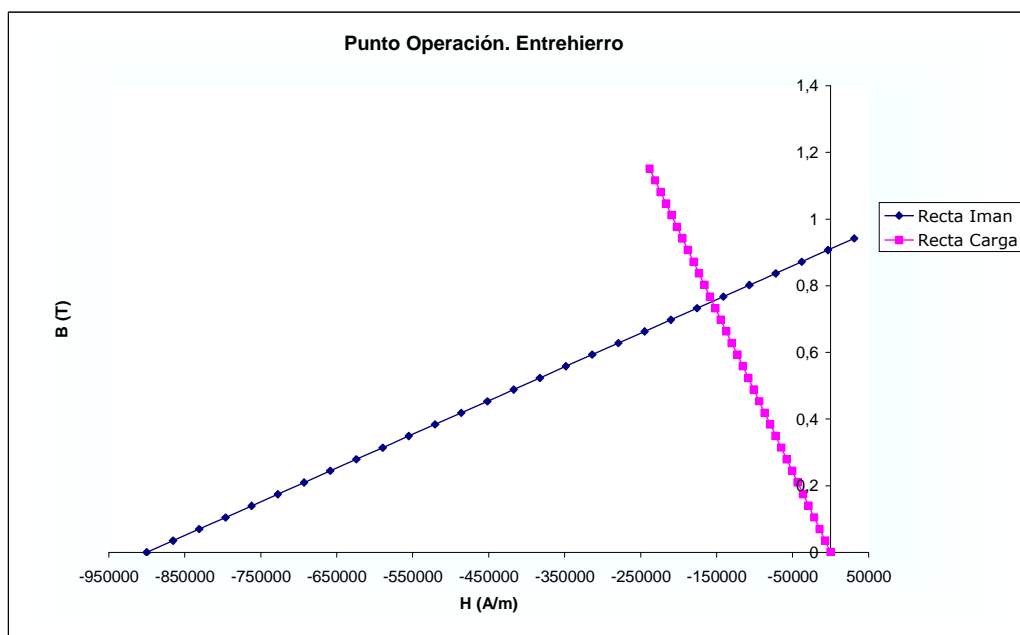
$$1. \quad B_{im} = B_r + \frac{H_i}{H_c} \cdot B_r$$

$$2. \quad B_g = \mu_0 \cdot H_g$$

En este punto se observa la necesidad de una tercera ecuación que interrelacione las ya existentes para poder representar ambas en una misma grafica. Con la siguiente ecuación se consigue:

$$B_g = \frac{B_{im} \cdot S_{im}}{S_g}$$

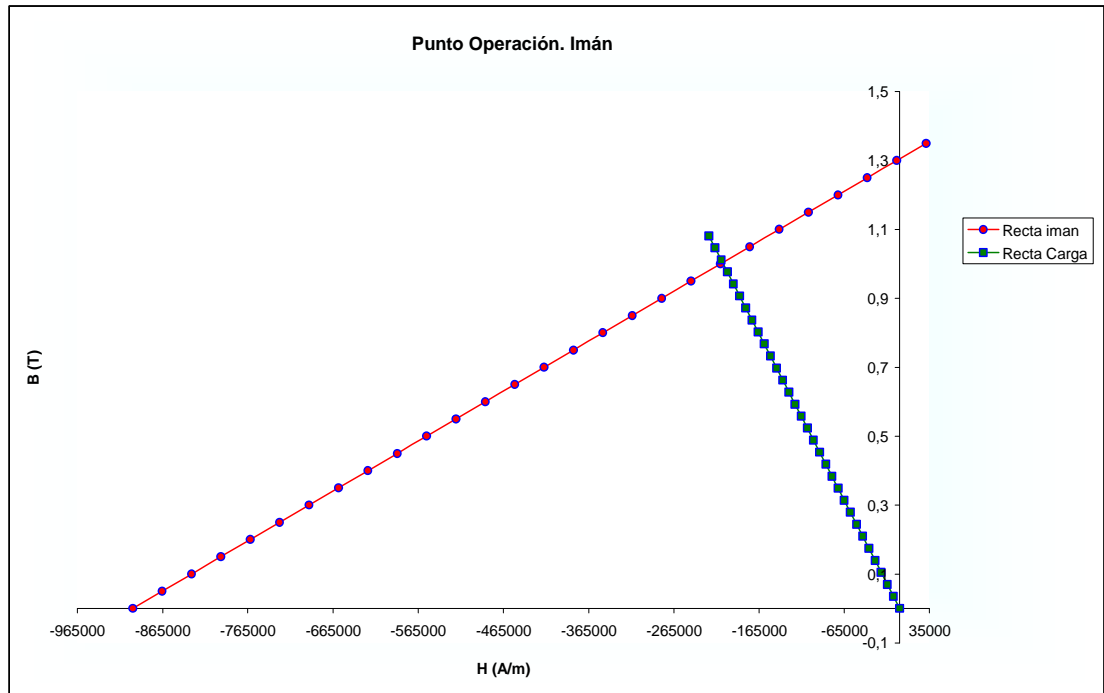
De esta manera, se obtiene la grafica referida al entrehierro donde se verá representado el punto de operación referido al entrehierro cuyo valor se calculó en el apartado anterior donde $B_g = 0,7543T$.



Existe la posibilidad de representarla refiriéndose al imán, en cuyo caso el punto de corte será:

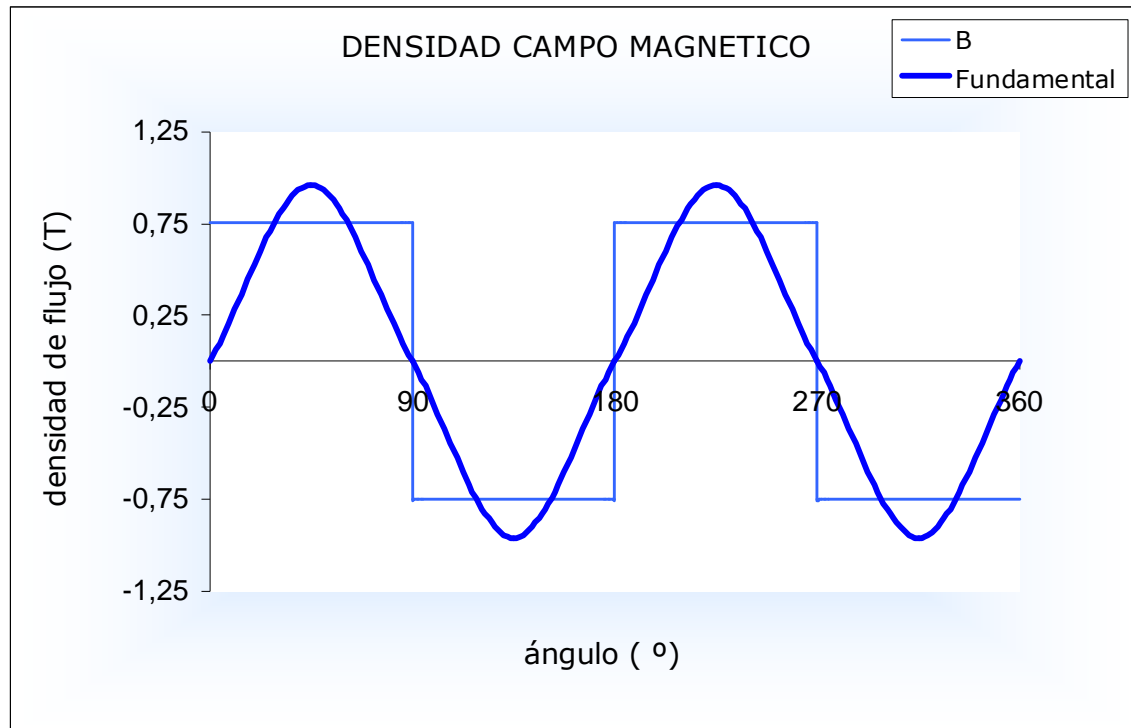
$$B_{im} = \frac{B_g \cdot S_g}{S_{im}} = \frac{(0,7543) \cdot (0,04128)}{(0,0288)} = 1,07T$$

A continuación se expone la grafica.



3.10.4. DISTRIBUCIÓN CAMPO MAGNÉTICO:

Como se ha introducido anteriormente, el campo magnético de la maquina en el ensayo de vacío es creado por los imanes alojados en el rotor



Por tratarse de una máquina de dos pares de polos la densidad de flujo magnético varía cada 90° mecánicos, es decir, las líneas de campo entran y salen del rotor cuatro veces para un solo ciclo de la máquina.

Por haber despreciado el efecto de las ranuras, el valor de la densidad de flujo magnético tanto en el semiciclo positivo como en el negativo será constante generando así una forma de onda cuadrada.

Se puede expresar la transformada de Fourier con la siguiente ecuación:

$$B(\theta) = B_{1\max} \cdot \text{sen}(\theta) + B_{3\max} \cdot \text{sen}(3\theta) + B_{5\max} \cdot \text{sen}(5\theta) \dots$$

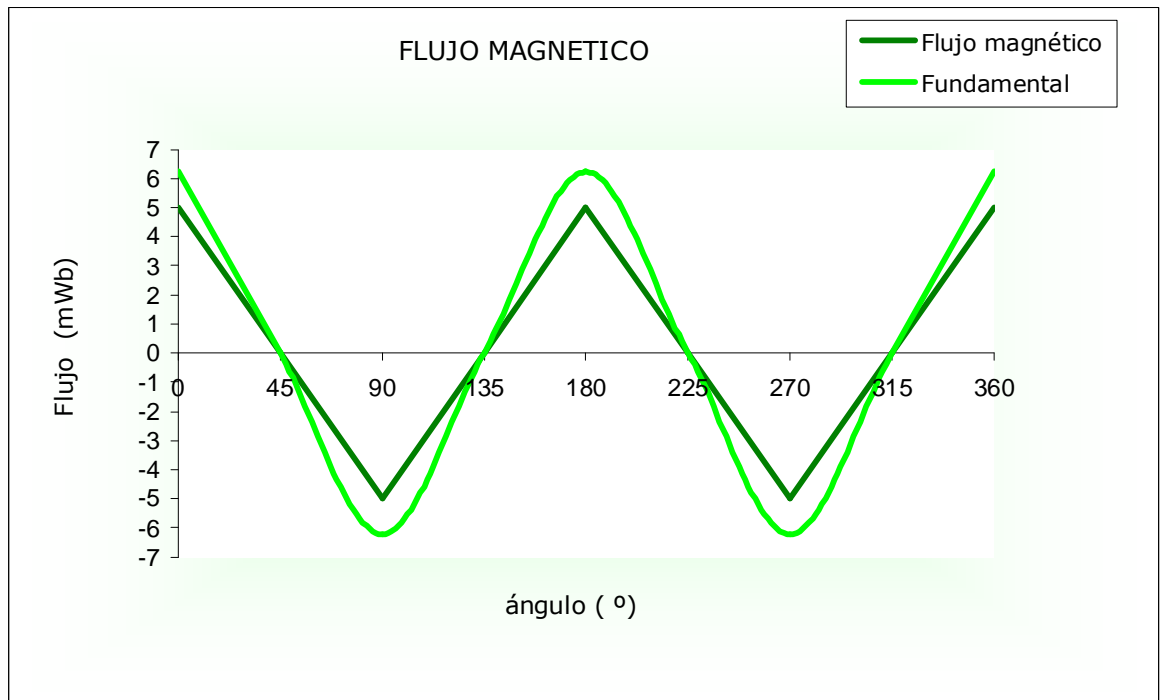
El valor de la fundamental es:

$$B_f = \frac{4}{\pi} \cdot B \cdot kd_1 = \frac{4}{\pi} \cdot 0,7543 \cdot 0,9598 = 0,9218T$$

3.10.5. FLUJO MAGNÉTICO:

El valor del flujo magnético máximo por polo, se calcula con la siguiente expresión tomando la B fundamental y la superficie del entrehierro como $2 \cdot r \cdot l$:

$$\phi = \int_s B(\theta) \cdot dS = \int_0^\pi B(\theta) \cdot l \cdot r \cdot d\theta = \frac{1}{2} 0.9218 \cdot 2 \cdot \frac{120}{1000} \cdot \frac{54,75}{1000} = 6,1 mWb$$

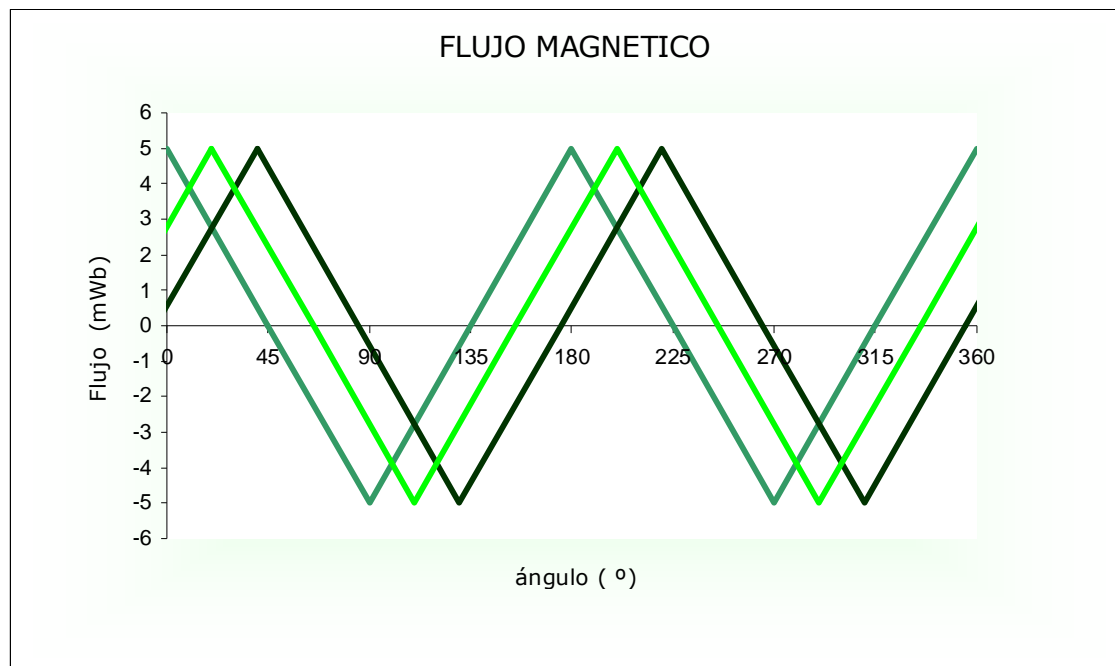


Se procede a continuación ha mostrar el flujo visto por las 3 fases. Se tendrá en cuenta que, las formas de onda estarán desfasadas un ángulo eléctrico entre sí por estar las bobinas alojadas en diferentes ranuras.

Este ángulo eléctrico se calcula con la siguiente expresión, donde "Z" es el número de ranuras total de la máquina:

$$\alpha_{er} = \frac{2 \cdot \pi \cdot p}{Z} = \frac{4 \cdot \pi}{36} = 0.349 rad = 20^\circ$$

El flujo visto por las 3 fases queda:



3.10.6 TENSIÓN INDUCIDA:

La tensión inducida en cada uno de las espiras de los devanados, se calcula aplicando la ley de Faraday.

$$|e| = \left| \frac{d\phi}{dt} \right|$$

$$e_{esp} = - \frac{d\phi}{dt} = B \cdot l \cdot r \cdot 2\omega = 0.7543 \cdot \frac{120}{1000} \cdot \frac{54,75}{1000} \cdot 2 \cdot 157,07 = 1,5V$$

Al haber aplicado a la máquina la técnica del devanado distribuido, la tensión total inducida que vera cada una de las fases, será la suma de las tensiones inducidas en cada una de las bobinas que la componen

Por lo tanto, si cada fase esta compuesta por tres bobinas iguales alojadas en ranuras contiguas, entonces la tensión inducida total es.

$$e_{sal} = e_{b1} + e_{b2} + e_{b3}$$

Para saber la tensión inducida en cada una de ellas se utiliza la siguiente formula:

$$e_b = N \cdot e_{espira}$$

Por lo tanto es necesario saber el número de espiras de cada bobina. Para esto se realizaron los ensayos pertinentes a la maquina ya que este dato no estaba incluido en la placa de características del motor original.

Para despejar el número de espiras se necesita el dato del voltaje experimental que se toma a velocidad de 1500 rpm, y de donde se obtienen 203,6 voltios.

Por lo tanto es necesario saber el número de espiras de cada bobina. Para esto se realizaron los ensayos pertinentes a la maquina ya que este dato no estaba incluido en la placa de características del motor original.

Para despejar el número de espiras se necesita el dato del voltaje experimental que se toma a velocidad de 1500 rpm, y de donde se obtienen 203,6 voltios.

$$N_{seq} = \frac{V}{4,44 \cdot \phi_p \cdot f} = \frac{203,60V}{4,44 \cdot (6,22mWb) \cdot 50Hz} = 147espiras$$

Como N_s :

$$N_s = \frac{N_{seq}}{f_{distribución}}$$

$$N_{seq} = \frac{V}{4,44 \cdot \phi_p \cdot f} = \frac{203,60V}{4,44 \cdot (6,22mWb) \cdot 50Hz} = 147espiras$$

Como N_s :

$$N_s = \frac{N_{seq}}{f_{distribución}}$$

Este porcentaje factor de distribución viene dado por la siguiente tabla:

q	kd1	kd2	kd3
2	0.9659	0.707	0.258
3	0.9598	0.667	0.217
4	0.9577	0.653	0.205
5	0.9567	0.547	0.200

Donde q es el número de ranuras por polo y fase y se calcula con la siguiente expresión:

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3$$

Con lo cual, los coeficientes a aplicar son los siguientes:

3	0.9598	0.667	0.217
---	--------	-------	-------

De donde para $q=3$, $f = 0,9598$, tenemos:

$$N_s = \frac{N_{seq}}{f_{distribución}} = 153,15 \text{ espiras}$$

Obviamente, es imposible que el bobinado no tenga un número entero de espiras por lo que se redondeará a 153 espiras. Si cada fase esta compuesta por 153 espiras, cada bobina estará compuesta por $153/3$, o lo que es lo mismo, 51 espiras (un tercio del devanado completo).

Tomando el dato del número de espiras como real, y aprovechando este para compararlo con la tensión inducida en cada una de las bobinas de manera teórica:

$$e_{b1} = N \cdot e_{esp} = 51 \cdot 1,5 = 76,5V$$

$$e_{b1} = N \cdot e_{esp} = 51 \cdot 1,5 = 76,5V$$

$$e_{b1} = N \cdot e_{esp} = 51 \cdot 1,5 = 76,5V$$

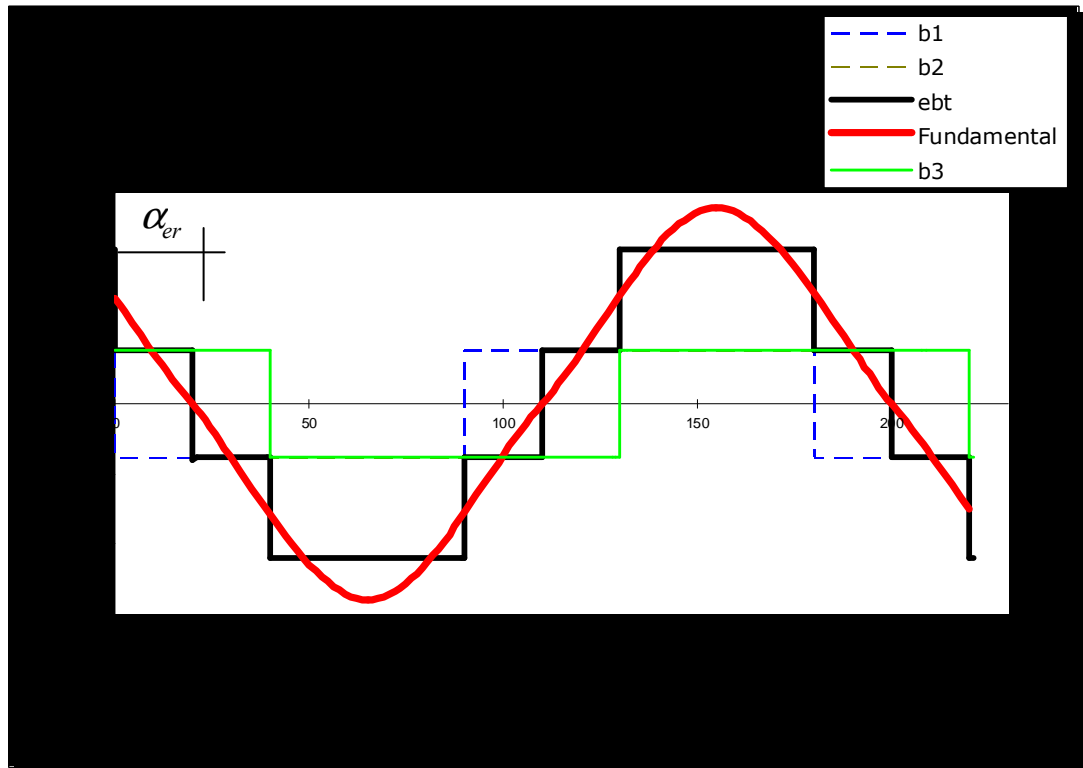
La tensión inducida total en cada fase:

$$e_{sal} = e_{b1} + e_{b2} + e_{b3} = 76,5 + 76,5 + 76,5 = 229 V$$

Se procede a continuación ha mostrar la forma de onda de la tensión inducida total de la fase, además de las formas de onda de las tensiones de los bobinados que la componen. Se tendrá en cuenta que, las formas de onda de los bobinados estarán desfasadas un ángulo eléctrico entre sí por estar estas alojadas en diferentes ranuras.

Este ángulo eléctrico se calcula con la siguiente expresión, donde "Z" es el número de ranuras total de la máquina:

$$\alpha_{er} = \frac{2 \cdot \pi \cdot p}{Z} = \frac{4 \cdot \pi}{36} = 0.349 \text{ rad} = 20^\circ$$



La forma de onda de la tensión total inducida es la suma de dos formas de onda cuadrada, por lo que se puede considerar que en la transformada de Fourier predominaran los términos impares presentando la siguiente expresión:

$$e(t) = E_{1\max} \cdot \text{sen}(\Omega t) + E_{3\max} \cdot \text{sen}(3\Omega t) + E_{5\max} \cdot \text{sen}(5\Omega t) + \dots$$

Al haber aplicado la técnica del devanado distribuido, los valores obtenidos de la fundamental como de los armónicos, disminuirán en un porcentaje respecto al devanado concentrado. Este porcentaje es definido por el factor de distribución que se muestra en la siguiente tabla:

q	kd1	kd2	kd3
2	0.9659	0.707	0.258
3	0.9598	0.667	0.217
4	0.9577	0.653	0.205
5	0.9567	0.547	0.200

Donde q es el número de ranuras por polo y fase y se calcula con la siguiente expresión:

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3$$

Con lo cual, los coeficientes a aplicar son los siguientes:

3	0.9598	0.667	0.217
---	--------	-------	-------

El valor de la fundamental y de los armónicos entonces:

$$E_{n\max} = \frac{4}{n\pi} \cdot e_{sal} \cdot k_{dn}$$

$$- E_{1\max} = \frac{4}{n\pi} \cdot e_{sal} \cdot k_{d1} = \frac{4}{1 \cdot \pi} \cdot 229 \cdot 0,9597 = 279,8V$$

$$- E_{3\max} = \frac{4}{n\pi} \cdot e_{sal} \cdot k_{d3} = \frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot 229 \cdot 0.667 = 64,8V$$

$$- E_{5\max} = \frac{4}{n\pi} \cdot e_{sal} \cdot k_{d5} = \frac{4}{5 \cdot \pi} \cdot 229 \cdot 0.217 = 12,65V$$

3.11. CÁLCULOS TEÓRICOS EN CARGA.

3.11.1. INTRODUCCIÓN:

Se ha realizado un ensayo en carga a la máquina para poder obtener el valor del par generado cuando la máquina funciona como motor y generador. Para ambos funcionamientos se ha realizado un análisis teórico y otro en JMAG.

En el caso del motor, se ha alimentado el estator con una fuente de corriente alterna trifásica con las siguientes características:

- Trifásica.
- Valor pico (I_0) : 4 A

$$\begin{aligned}I_R &= I_0 \cdot \text{sen}(2\pi ft) \\I_S &= I_0 \cdot \text{sen}(2\pi ft + 120^\circ) \\I_T &= I_0 \cdot \text{sen}(2\pi ft - 120^\circ)\end{aligned}$$

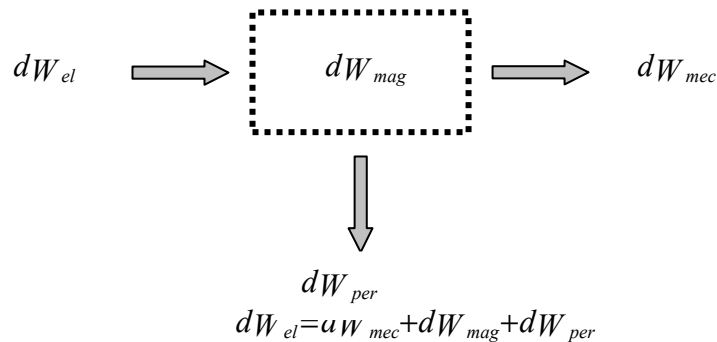
Para el generador sin embargo, se ha conectado en bornes del estator una carga trifásica equilibrada conectada en estrella puramente resistiva de tal forma que esta haga que circule corriente por los devanados del estator.

Carga resistiva equilibrada:

$$R_R = R_S = R_T = 110\Omega$$

3.11.2. CÁLCULO TEÓRICO DEL PAR:

Para los cálculos teóricos del ensayo en carga se ha supuesto la misma máquina que la utilizada en el ensayo de vacío. El par se obtiene aplicando el principio de la conservación de la energía para un dispositivo electromagnético.



Al considerar la máquina como ideal las pérdidas eléctricas pueden despreciarse sacándolas fuera del sistema y por tanto el dispositivo puede analizarse como un dispositivo electromecánico de conversión sin pérdidas.

$$dW_{el} = dW_{mec} + dW_{mag}$$

$$dW_{el} = e \cdot idt = id\psi$$

$$dW_{mec} = T \cdot d\theta_m = T \cdot \Omega dt$$

$$dW_{mag}(\psi, \theta_m) = id\psi - T \cdot d\theta_m$$

El par podría entonces calcularse:

$$T = - \frac{\partial W_{mag}(\psi, \theta_m)}{\partial \theta_m}$$

Sin embargo, el par puede calcularse más fácilmente utilizando el concepto de coenergía, cuya definición es:

$$W'_{mag}(i, \theta_m) = \psi \cdot i - W_{mag}$$

Por lo tanto, utilizando la coenergía magnética, el par presenta la siguiente expresión:

$$T = \frac{\partial W'_{mag}(i, \theta_m)}{\partial \theta_m} = -p \cdot M_{sr} \cdot i_A \cdot i_a \cdot \sin(p\theta_m)$$

Sustituyendo M_{sr} por su valor e introduciendo las amplitudes de las fuerzas magnetomotrices de cada devanado (F_A y F_a):

$$M_{sr} = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot R \cdot l}{\pi \cdot p^2 \cdot g} \cdot N_{req} \cdot N_{seq}$$

$$F_A = \frac{4 \cdot N_{seq} \cdot i_A}{2 \cdot \pi \cdot p}$$

$$F_a = \frac{4 \cdot N_{req} \cdot i_a}{2 \cdot \pi \cdot p}$$

Para una máquina de rotor bobinado el par se expresa de la siguiente forma:

$$T = - \frac{p \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot R \cdot l}{g} \cdot F_A \cdot F_a \cdot \sin(p\theta_m)$$

Sin embargo, para una máquina de imanes permanentes en la cual no circula corriente por el rotor, será necesario relacionar la densidad del flujo magnético con la corriente que circularía por el devanado del rotor como si de una máquina con rotor bobinado se tratara.

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N_{req} \cdot i_a}{2 \cdot g \cdot p}$$

$$N_{req} \cdot i_a = \frac{B \cdot 2 \cdot g \cdot p}{\mu_0}$$

Sustituyendo, la fuerza magnetomotriz del rotor es:

$$F_a = \frac{4 \cdot N_{req} \cdot i_a}{2 \cdot \pi \cdot p} = \frac{4 \cdot B \cdot 2 \cdot g \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot p \cdot \mu_0} = 4 \cdot \frac{Bg}{\pi \mu_0}$$

Por lo tanto el par para una máquina de imanes permanentes es el siguiente:

$$T = -\frac{p \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot R \cdot l}{g} \cdot F_A \cdot F_a \cdot \sin(p\theta_m) = -\frac{8 \cdot R \cdot l \cdot B \cdot N_{seq}}{\pi} \cdot i_A \cdot \sin(p\theta_m)$$

Donde:

B: densidad de campo magnético en el entrehierro

R: Radio medio del entrehierro

l: Longitud de la máquina

N_{seq} : Devanado equivalente.

i_A : Corriente del estator.

3.11.3. PAR COMO MOTOR:

Conocida la fuente de corriente que se conectará a los devanados del estator y conocida la expresión del par para una máquina de imanes permanentes se procede a calcular el par del motor.

Será necesario calcular el devanado equivalente de la siguiente forma.

$$N_{seq} = K_{d1} \cdot N_s = (0.9598) \cdot (153) = 147$$

Por lo tanto sustituyendo en la definición de par, se tiene:

$$\begin{aligned} T &= -\frac{p \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot R \cdot l}{g} \cdot F_A \cdot F_a \cdot \sin(p\theta_m) = -\frac{8 \cdot R \cdot l \cdot B \cdot N_{seq}}{\pi} \cdot i_A \cdot \sin(p\theta_m) = \\ &= \frac{8 \cdot \frac{54,75}{1000} \cdot 0.12 \cdot 0.7543 \cdot 147}{\pi} \cdot 4 = 7,42 N \cdot m \end{aligned}$$

El par máximo que presentará el motor será:

$$T = 7,42 N \cdot m$$

3.11.4. PAR COMO GENERADOR:

Para poder utilizar la definición del par será necesario calcular la corriente que circule por los devanados aplicando la ley de Ohm.

Al ser la carga resistiva mucho mayor que la impedancia del bobinado, ésta puede despreciarse y por lo tanto:

$$V = R \cdot I$$

$$I_A = \frac{V}{R} = \frac{\frac{350}{\sqrt{3}}}{110} = 1,83 A$$

Donde I_A es el valor pico de la corriente que circulará por cada uno de los devanados de las fases.

Considerando además, que el devanado equivalente no varía entre un funcionamiento y otro, el par es:

$$\begin{aligned} T &= -\frac{p \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot R \cdot l}{g} \cdot F_A \cdot F_a \cdot \sin(p\theta_m) = -\frac{8 \cdot R \cdot l \cdot B \cdot N_{seq}}{\pi} \cdot i_A \cdot \sin(p\theta_m) = \\ &= \frac{8 \cdot \frac{54,75}{1000} \cdot 0,12 \cdot 0,7543 \cdot 147}{\pi} \cdot 1,83 = -3,4 N \cdot m \\ T &= -3,4 N \cdot m \end{aligned}$$

3.12. ANÁLISIS DE JMAG EN VACÍO:

3.12.1. INTRODUCCIÓN:

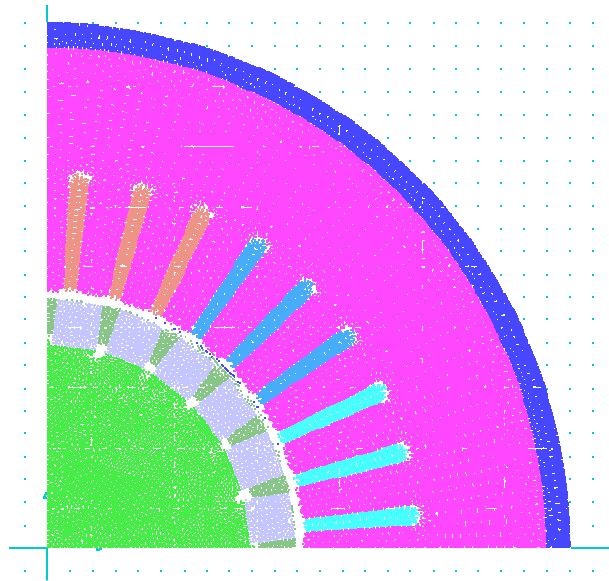
Al igual que con el generador real en JMAG se ha realizado un ensayo en vacío para contrastar los resultados a nivel teórico y práctico.

Primero se ha estudiado la densidad de campo magnético para finalmente ver los resultados de la tensión inducida.

3.12.2. INSTRUCCIONES PREVIAS EN JMAG:

Al igual a todos los programas de simulación JMAG requiere de un proceso de diseño del modelo, antes de la simulación. En el presente proyecto se van a exponer directamente los resultados obtenidos en la simulación.

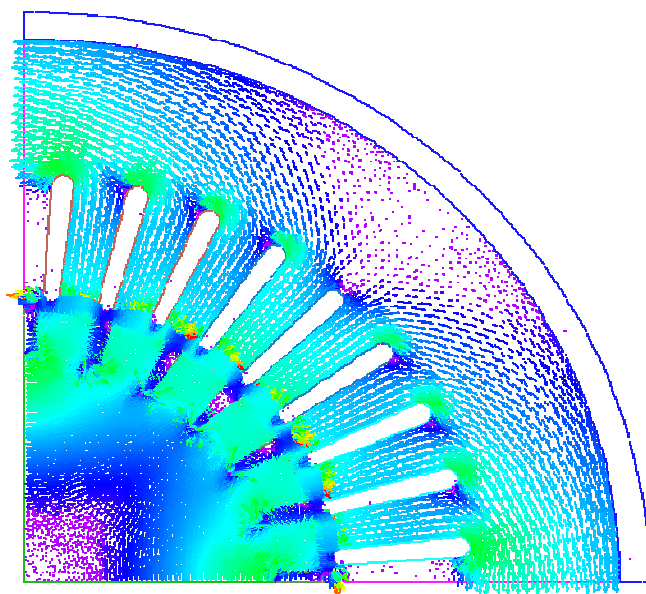
Una vez dibujado el modelo se procede al mallado obteniendo el siguiente resultado.



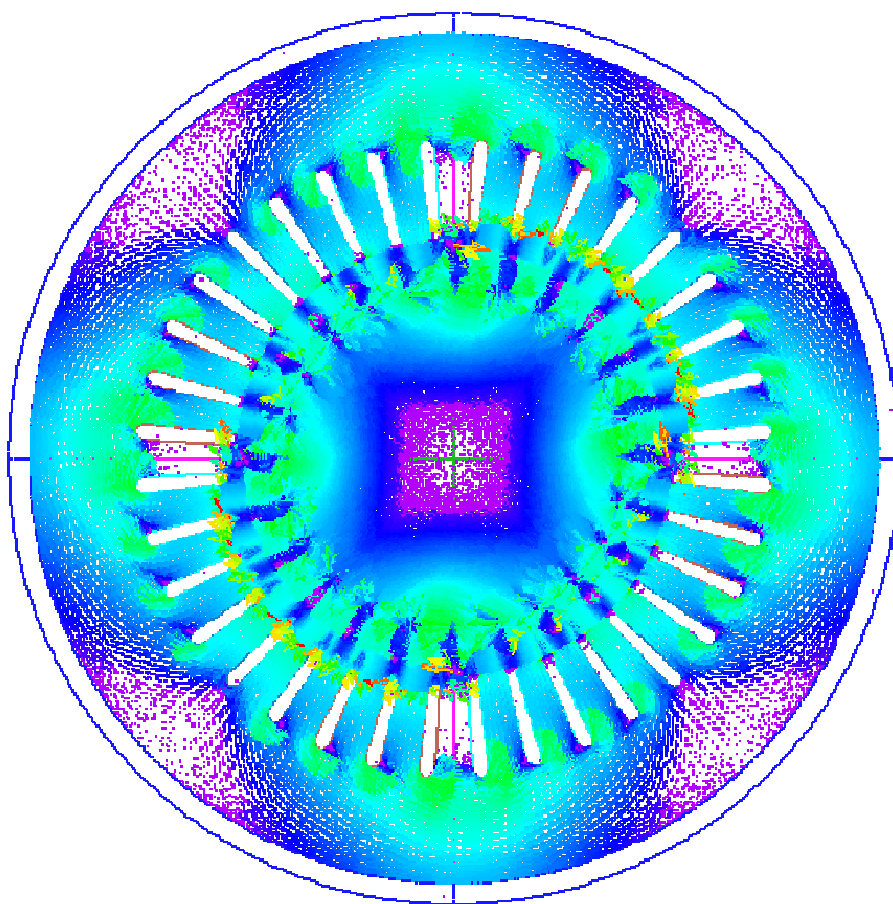
3.12.3. DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO EN EL ENTREHIERRO:

Una vez concluido todo el proceso previo a la simulación, se analizan los resultados referentes a la densidad de flujo magnético en el entrehierro.

Se puede obtener como ayuda para el análisis, la imagen de la distribución del campo magnético a lo largo de la sección de la máquina.



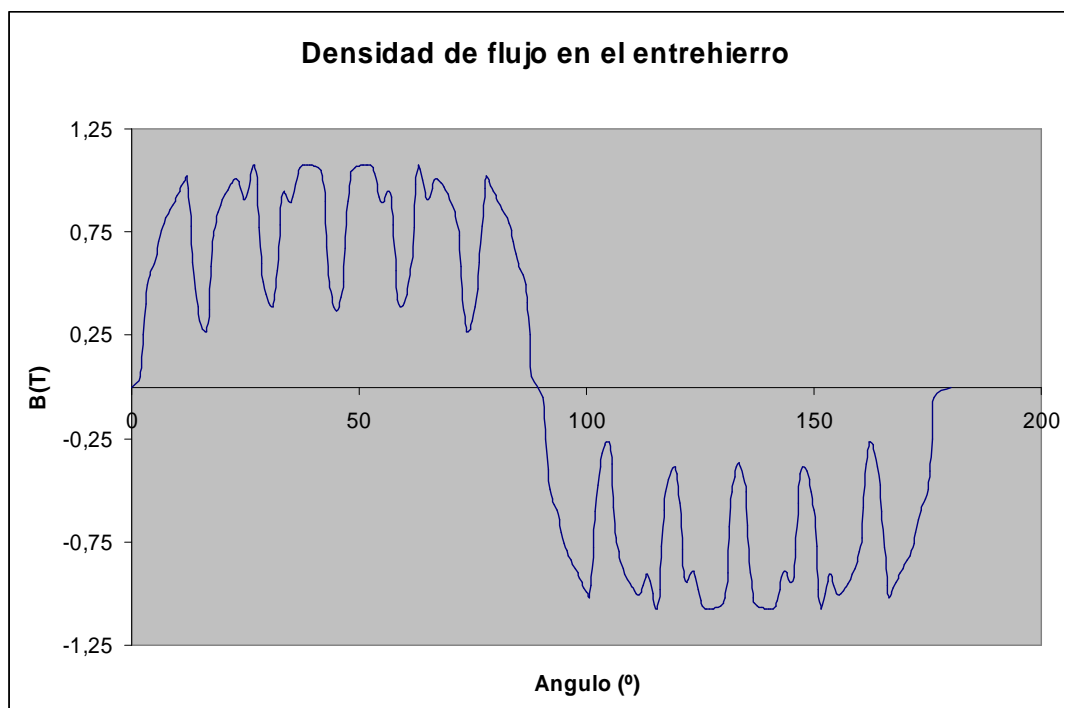
También se puede observar la densidad de flujo magnético para la máquina completa:



A continuación se pueden observar los vectores de campo magnético que van del polo norte al polo sur atravesando tanto el rotor como el estator y definiendo una dirección circular tal y como se especificó en las propiedades del imán.

A continuación se muestra la forma de onda que presenta la densidad de flujo. Se podrá observar como las ranuras en las que van encajonados los imanes y que los imanes no son redondeados sino que forman un polígono de muchas caras influye directamente en la forma de onda, así como el que las ranuras donde van alojadas las bobinas en este diseño a pesar de intentar ser lo más exactas posible, difieren de las reales en detalles como los acabados, más afilados en la simulación que en la realidad que son más redondeados.

El programa pregunta entonces el radio para el cual se desea obtener la forma de onda. Introduciendo el valor del radio del entrehierro se obtiene:



Efectivamente, JMAG no desprecia el efecto de las ranuras ni de que los imanes formen un polígono, por lo tanto, tal y como se puede observar la densidad de flujo magnético no es constante.

La forma de onda presenta una serie de variaciones entre 0.3 y 0.7 teslas debido a la superficie que ocupan las ranuras en las cuales se encuentra el aire.

Por tratarse además de una señal semicuadrada el valor del primer armónico o fundamental es:

$$B(t) = B_{1\max} \cdot \sin(\Omega t) + B_{3\max} \cdot \sin(3\Omega t) + B_{5\max} \cdot \sin(5\Omega t) \dots$$

Al haber aplicado la técnica del devanado distribuido, los valores obtenidos de la fundamental como de los armónicos, disminuirán en función de un porcentaje.

Este porcentaje es definido por el factor de distribución que se muestra en la siguiente tabla:

q	kd1	kd2	kd3
2	0.9659	0.707	0.258
3	0.9598	0.667	0.217
4	0.9577	0.653	0.205
5	0.9567	0.547	0.200

En nuestro caso se cogerá la segunda fila, ya que nuestra máquina dispone de tres ranuras por fase.

El valor de la fundamental y de los armónicos entonces:

$$B_{n\max} = \frac{4}{n\pi} \cdot B_{sal} \cdot k_{dn}$$

$$B_{1\max} = \frac{4}{n\pi} \cdot B_{sal} \cdot k_{d1} = \frac{4}{1 \cdot \pi} \cdot 0.7437 \cdot 0.9598 = 0.908 \text{ T}$$

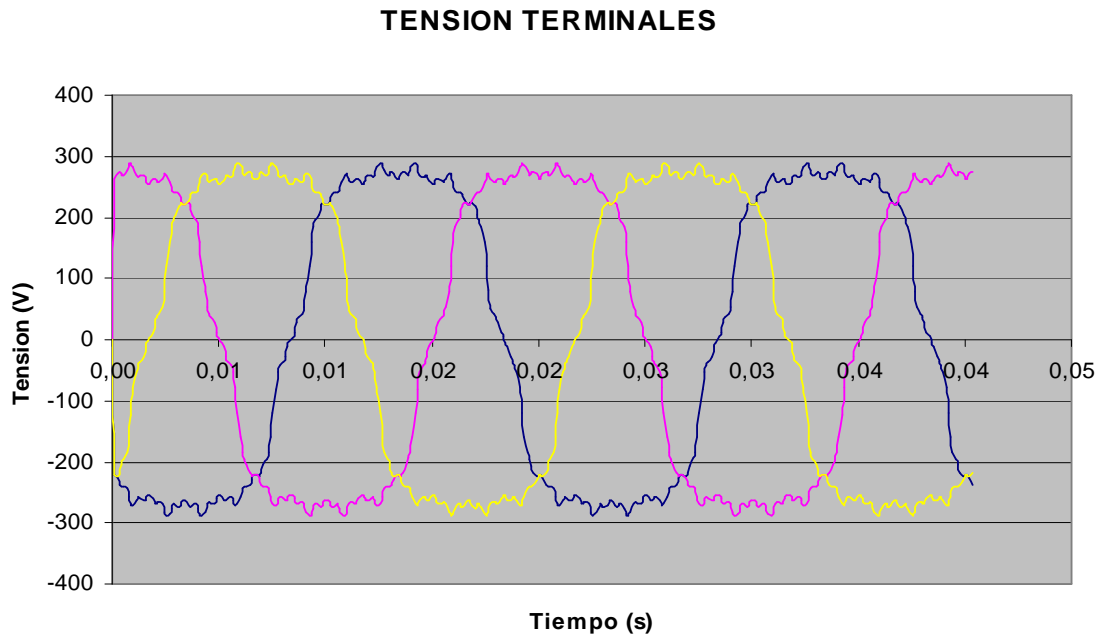
$$B_{3\max} = \frac{4}{n\pi} \cdot B_{sal} \cdot k_{d3} = \frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot 0.7437 \cdot 0.667 = 0.21 \text{ T}$$

$$B_{5\max} = \frac{4}{n\pi} \cdot B_{sal} \cdot k_{d5} = \frac{4}{5 \cdot \pi} \cdot 0.7437 \cdot 0.217 = 0.041 \text{ T}$$

3.12.4. Tensión INDUCIDA:

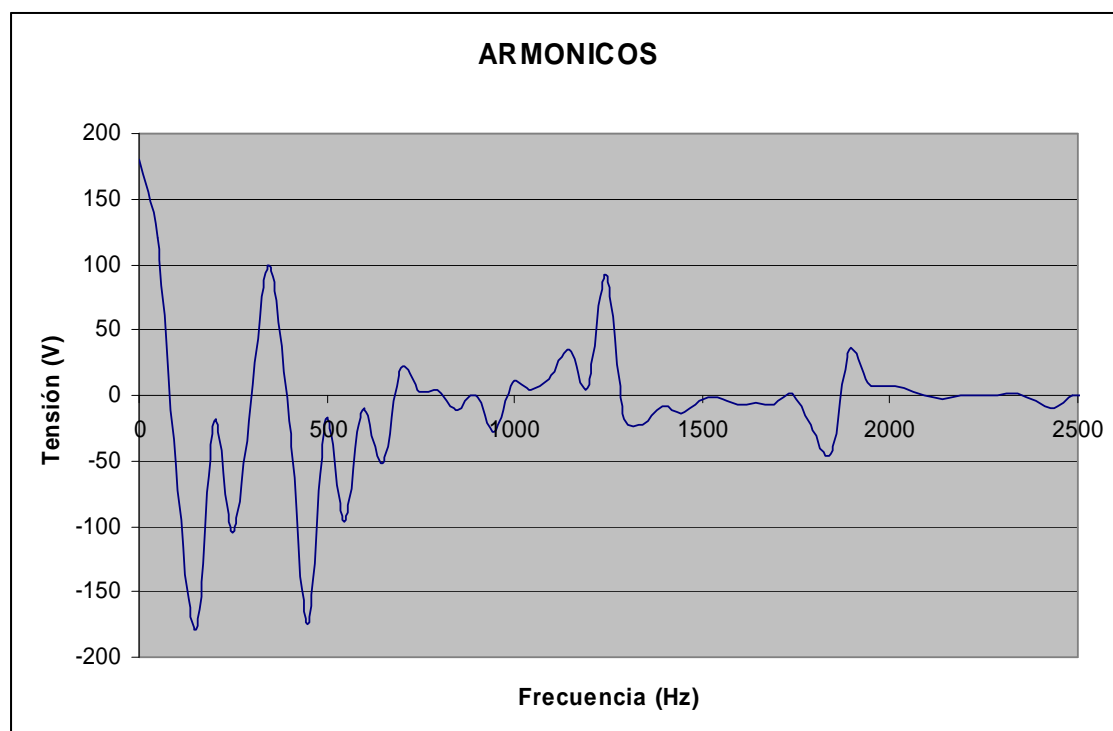
Se obtiene a continuación la forma de onda de la tensión total inducida en los devanados de cada una de las fases.

Para tener la forma de onda de la tensión de salida:



La forma de onda, es trifásica de carácter senoidal debido a la densidad de flujo magnético que también es de carácter senoidal. Tal y como se aprecia, la señal no es pura, se ve condicionada por las componentes armónicas de la tensión, dentro de las cuales predominarán los múltiplos impares. Por lo tanto, queda demostrado que el utilizar técnicas para la eliminación de armónicos no implica la eliminación total de la influencia de estos, sino la atenuación en la medida de lo posible.

Para poder poner un ejemplo ha esta situación, lo idóneo es mostrar la transformada de Fourier para una de las fases.



Efectivamente la tensión fundamental está seguida de una serie de armónicos, donde predominan los armónicos impares.

La transformada de Fourier presenta la siguiente ecuación:

$$e(t) = E_{1\max} \cdot \text{sen}(\Omega t) + E_{3\max} \cdot \text{sen}(3\Omega t) + E_{5\max} \cdot \text{sen}(5\Omega t) \dots$$

Para hallar la tensión de la fundamental y de los armónicos impares que influyen en la tensión de salida, nos serviremos de ecuaciones análogas y con el cuadro de factores de distribución

3.13. JMAG EN CARGA.

Manteniendo el esquema de los apartados anteriores se procede a continuación a realizar el análisis del ensayo en carga por medio de JMAG para luego poder compararlo con el teórico y la realidad.

En el caso de hacerlo funcionar como motor, se ha alimentado el estator con una fuente de corriente alterna trifásica con las siguientes características:

- Trifásica.
- Valor pico (I_0) : 4 A

$$\begin{aligned} I_R &= I_0 \cdot \text{sen}(2\pi ft) \\ - \quad I_S &= I_0 \cdot \text{sen}(2\pi ft + 120^\circ) \\ I_T &= I_0 \cdot \text{sen}(2\pi ft - 120^\circ) \end{aligned}$$

Para el generador sin embargo, se ha conectado en bornes del estator una carga trifásica equilibrada conectada en estrella puramente resistiva de tal forma que esta haga que circule corriente por los devanados del estator.

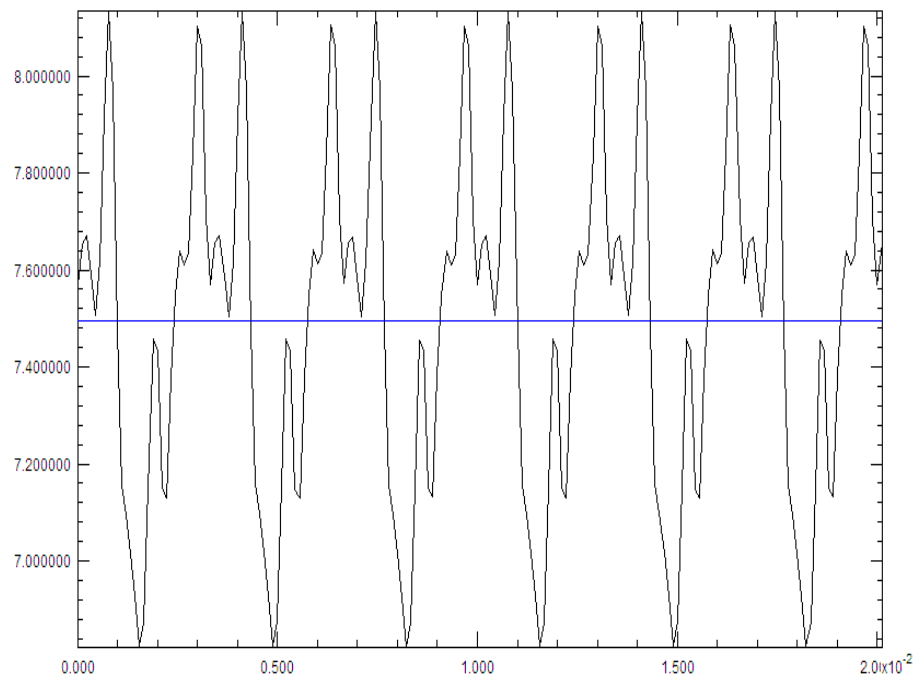
Carga resistiva equilibrada:

$$R_R = R_S = R_T = 110 \cdot \Omega$$

3.13.1. PAR DEL MOTOR:

Una vez diseñado el circuito se procede a simular en JMAG y finalmente a analizar los resultados obtenidos.

Se obtiene la forma de onda y el valor del par resultando del siguiente modo:



El valor medio que presenta el par es:

$$T = 7.49 \text{ N} \cdot \text{m}$$

3.13.2. PRINCIPIO CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA:

El principio ha sido simplificado, despreciando las pérdidas magnéticas, para facilitar los cálculos.

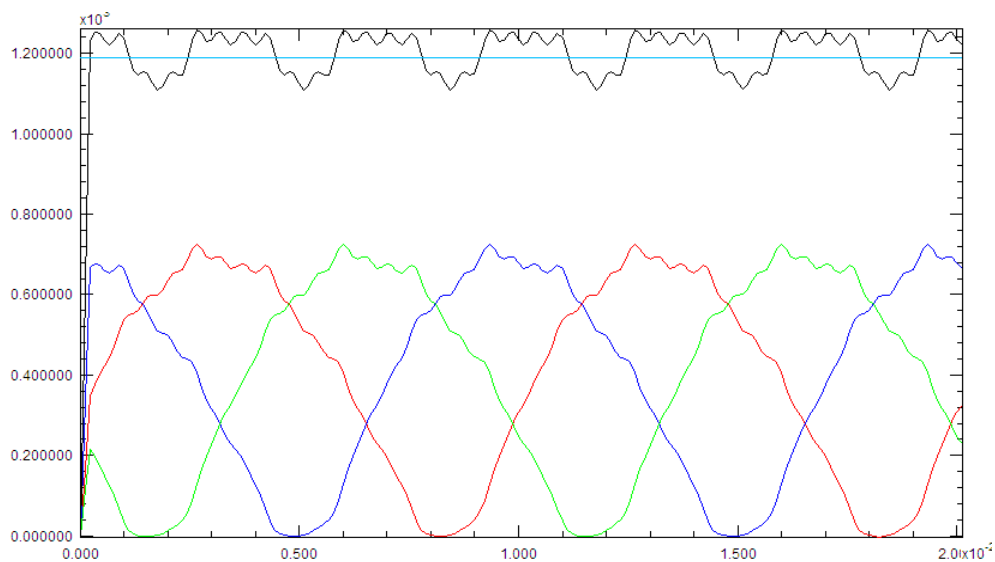
$$dW_{el} = dW_{mec}$$

$$dW_{el} = e \cdot idt$$

$$dW_{mec} = T \cdot \Omega$$

$$T = \frac{e \cdot idt}{\Omega dt} = \frac{P_{generada}}{\Omega}$$

Se obtiene a continuación la potencia eléctrica generada por la fuente de la siguiente forma:



El valor medio de la potencia total es:

$$P=1190W$$

Si el motor consume la potencia hallada y gira a 1500 rpm entonces el par será:

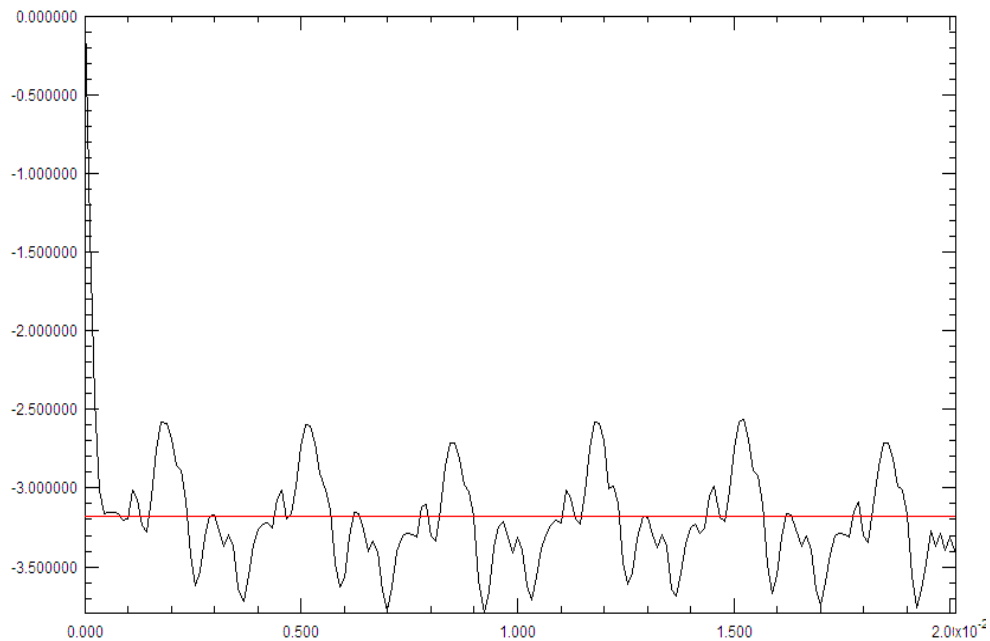
$$T = \frac{P_{generada}}{\Omega} = \frac{1190}{157.07} = 7.57 N \cdot m$$

Se puede observar que el par calculado teóricamente y el del JMAG coincide

3.13.3. PAR DEL GENERADOR:

Para simular el funcionamiento como generador se ha diseñado la carga resistiva de valor 110 ohmios conectada en estrella. Además, se colocó un amperímetro en una de las fases para poder obtener el valor de la corriente que circulara por los devanados del estator.

La gráfica del par que presenta el simulador es la siguiente:



El valor medio que presenta el par es:

$$T = -3.18 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Se debe comentar que la media de la gráfica del par es inferior a la que realmente es. Esto se debe a que la gráfica empieza en 0 lo cual no es real y hace disminuir un poco la media.

En este caso también se ha comprobado la coherencia de los resultados obtenidos en JMAG por medio del principio de conservación de la energía.

3.13.4. PRINCIPIO CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA:

Aplicando el principio de la conservación de la energía donde se desprecian tanto las pérdidas magnéticas como las pérdidas por calor, se obtiene lo siguiente.

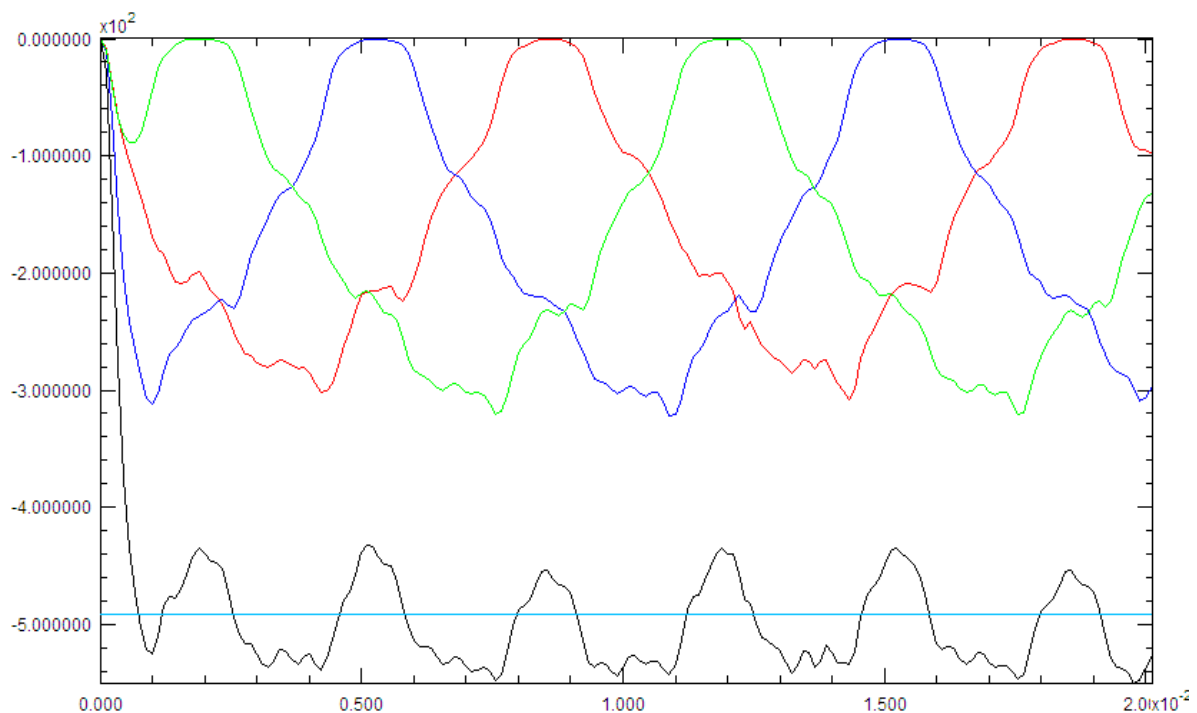
$$dW_{el} = dW_{mec}$$

$$dW_{el} = e \cdot idt$$

$$dW_{mec} = T \cdot \Omega$$

$$T = \frac{e \cdot idt}{\Omega dt} = \frac{P_{consumida}}{\Omega}$$

Se presenta por lo tanto la señal de la potencia consumida por la carga



El valor medio de la potencia total es: $P = -491 \text{ W}$

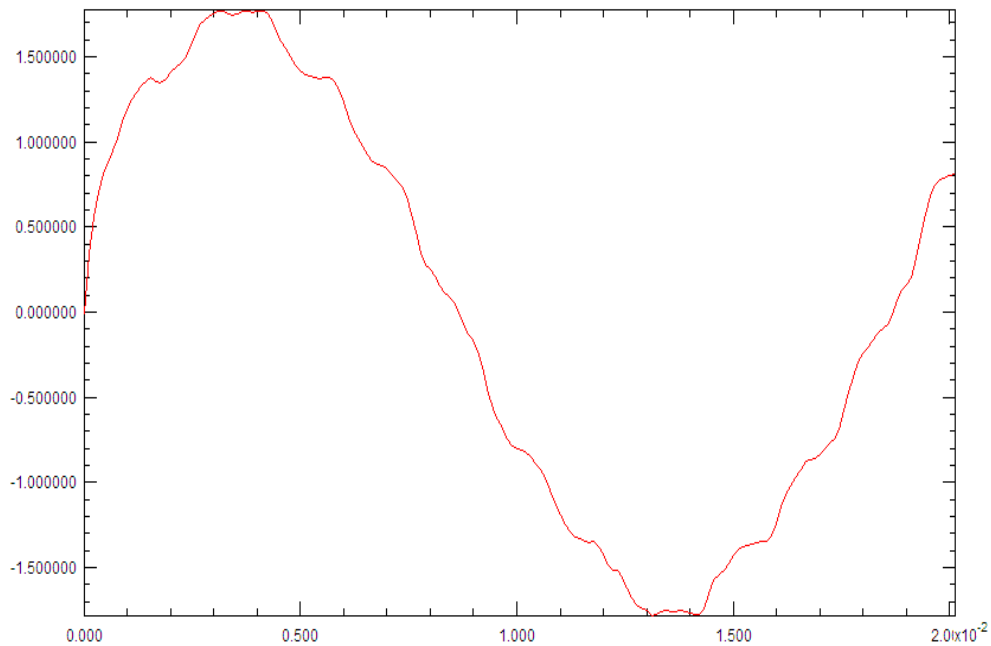
Por lo tanto, si la máquina gira a 1500 rpm entonces el valor del par:

$$T = \frac{P_{consumida}}{\Omega} = -\frac{491}{157.07} = -3.12 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Cabe comentar que los valores de par no son más exactos porque JMAG hace los valores medios de las gráficas partiendo siempre de 0.

Por otro lado, para el caso del generador, se ha medido la corriente que circula por la carga para comprobar si está correspondiente con la corriente calculada en el caso teórico.

La corriente medida para el generador con devanado distribuido es



El valor pico de la fundamental de la corriente que circulará por los devanados del estator es:

$$I_A = 1.77 \text{ A}$$

3.14. ENSAYOS PRÁCTICOS.

Como se ha comentado anteriormente se han extraído resultados con el osciloscopio del generador construido y que a continuación se presentan:

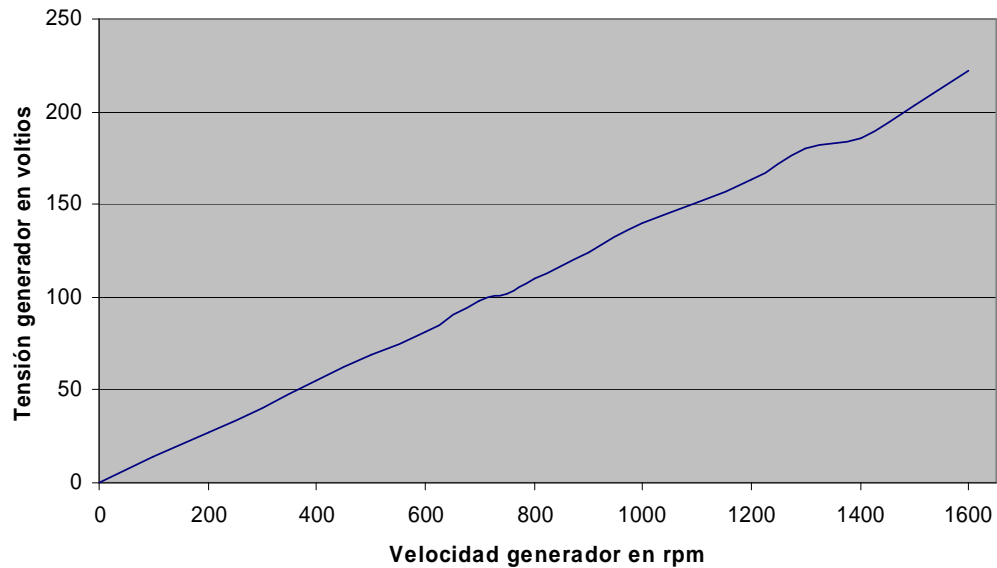
3.14.1. ENSAYO DE VACÍO.

El ensayo en vacío se realizó de la siguiente forma: Por medio de un acoplamiento se logró conectar nuestro generador a un motor de corriente continua.

Para ello se ha ido subiendo la velocidad de la máquina de continua por medio de un puente en H cogiendo valores de tensión y frecuencia a unas determinadas velocidades hasta obtener una velocidad de 1.500 rpm. y una frecuencia de 50 Hz.

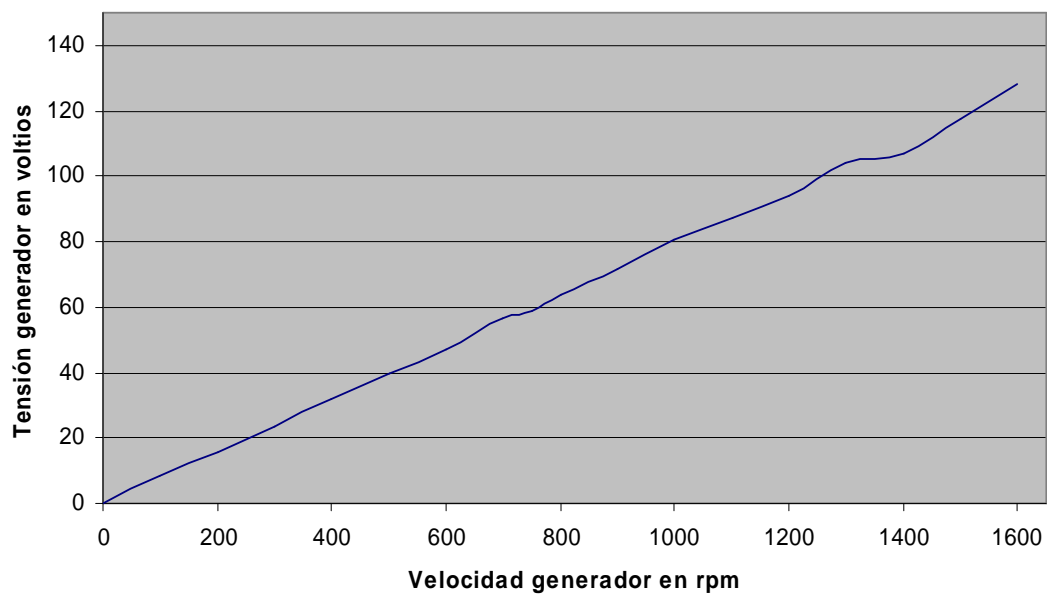
A continuación se puede observar la curva de vacío característica de nuestro generador.

Curva de vacío



A modo de curiosidad se puede observar que a la velocidad de sincronismo la tensión de vacío del generador es de unos 200 V. Tensión de fase ya que la conexión está en estrella.

Curva de vacío



Cuando la conexión está en triángulo la tensión se ve afectada bajando su valor raíz de tres veces menos y para una velocidad de giro de 1500 rpm su tensión de vacío es de unos 115 V.

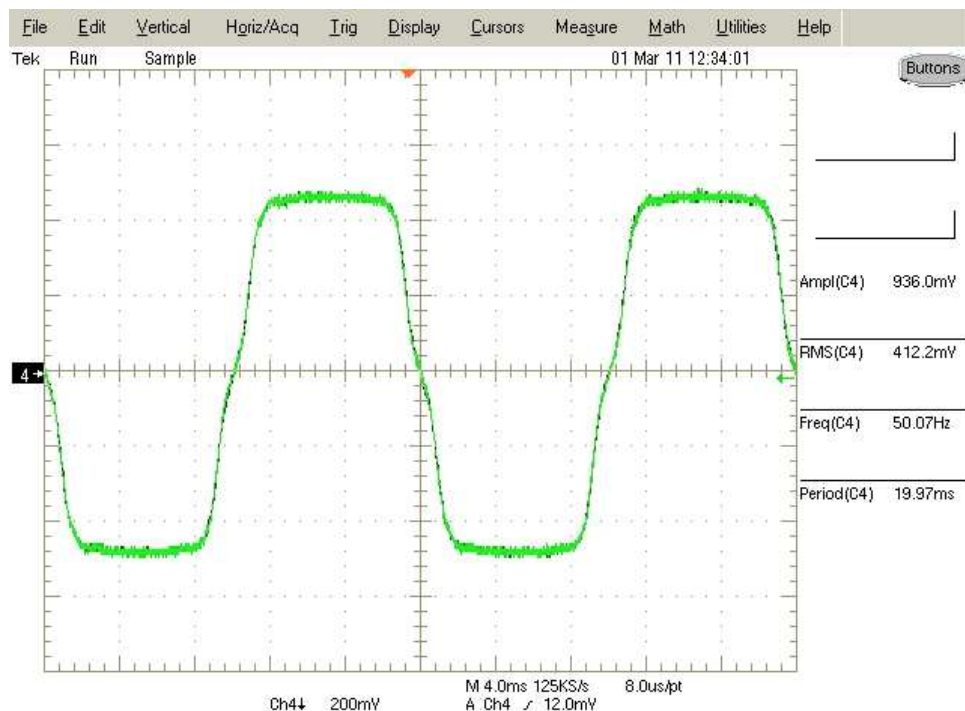
3.14.2. TENSION INDUCIDA.

Se obtiene a continuación la forma de onda de la tensión total inducida en los devanados de cada una de las fases.

Las formas de onda que a continuación se exponen se han obtenido a bajas revoluciones, que es a las que va a estar girando en un futuro y a velocidad nominal. Las formas de onda se han obtenido entre fase y neutro en el caso de la estrella.

También se va a exponer a modo de curiosidad la forma de onda de la tensión de vacío con la conexión en estrella y en triángulo.

3.14.2.1 A VELOCIDAD NOMINAL Y CONEXIÓN ESTRELLA



En la gráfica tomada desde el osciloscopio se puede observar la forma de onda de la tensión de vacío, y se puede decir que se parece bastante a la señal que obtuvimos en los ensayos con el JMAG. Si nos fijamos en el valor de la tensión eficaz se ve que es 412.2 mV, a este número hay que multiplicarlo por 1000 para pasarlo a voltios, y dividirlo por 500, ya que se colocó una sonda entre el osciloscopio y el generador, quedando una tensión de 206.1 V

También se observa que a esta velocidad la frecuencia de giro del rotor es de 50 Hz lo que significa que estamos en la velocidad de sincronismo.

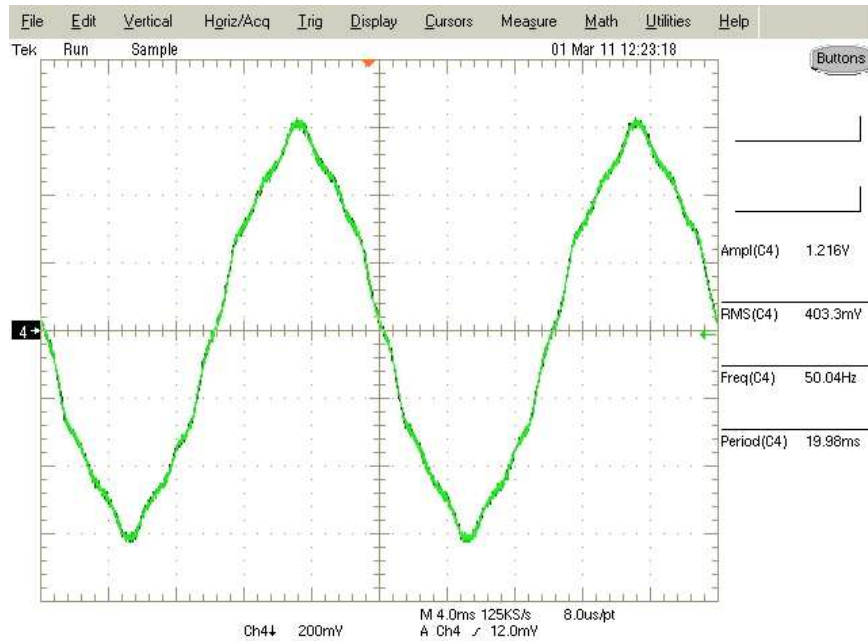
También se llega a observar los tres escalones que hay entre la parte superior y la inferior de la onda, esto se debe a las tres ranuras por fase que existe en el estator.

3.14.2.2 A 400 RPM Y CONEXIÓN ESTRELLA.



En esta gráfica se observa que la tensión de salida a 400 rpm es 55.2 V entre fase y neutro, (valores eficaces) y una frecuencia de 13.42 Hz

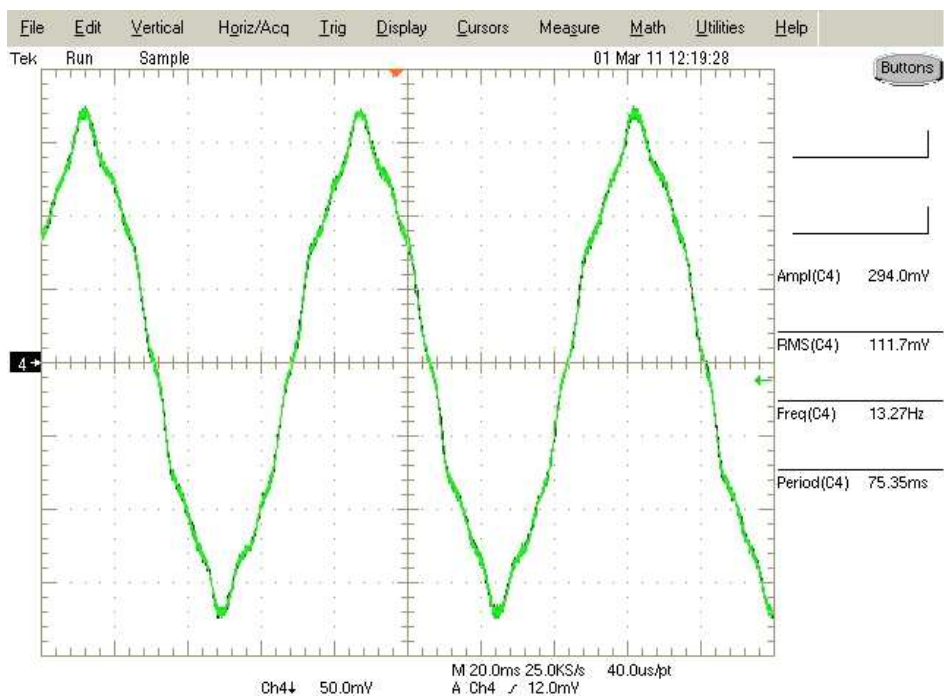
3.14.2.3 A VELOCIDAD NOMINAL Y CONEXIÓN TRIANGULO.



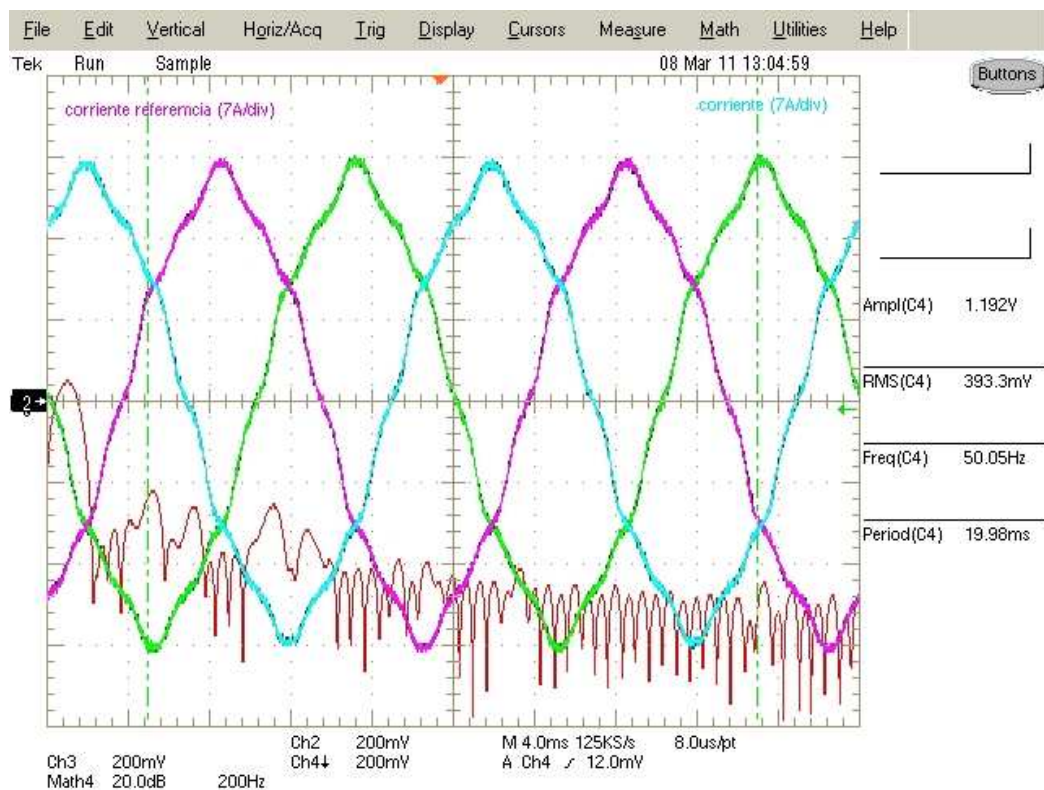
Algo curioso de esta onda es que es diferente a la de conexión en estrella a pesar de que estamos midiendo en bornes de la misma máquina. Este fenómeno se debe a que en la conexión estrella cuando se mide con el osciloscopio se está haciendo entre fase y neutro, es decir solo estamos midiendo lo que ocurre en un bobinado mientras que en conexión triángulo se mide entre dos fases.

Se puede observar también que la tensión que refleja el osciloscopio es de unos 200 V, raíz de tres veces menos que la tensión de línea en estrella, aunque lo que sí que es mayor es la corriente que es raíz de tres veces más.

3.14.2.4 A 400 RPM Y CONEXIÓN TRIANGULO.



Se va a colocar las tres señales de las ondas las cuales se ven desfasadas 120° .



En esta otra gráfica se puede observar que la forma de onda es exactamente proporcional a la de la página anterior y que su tensión es de unos 55V.

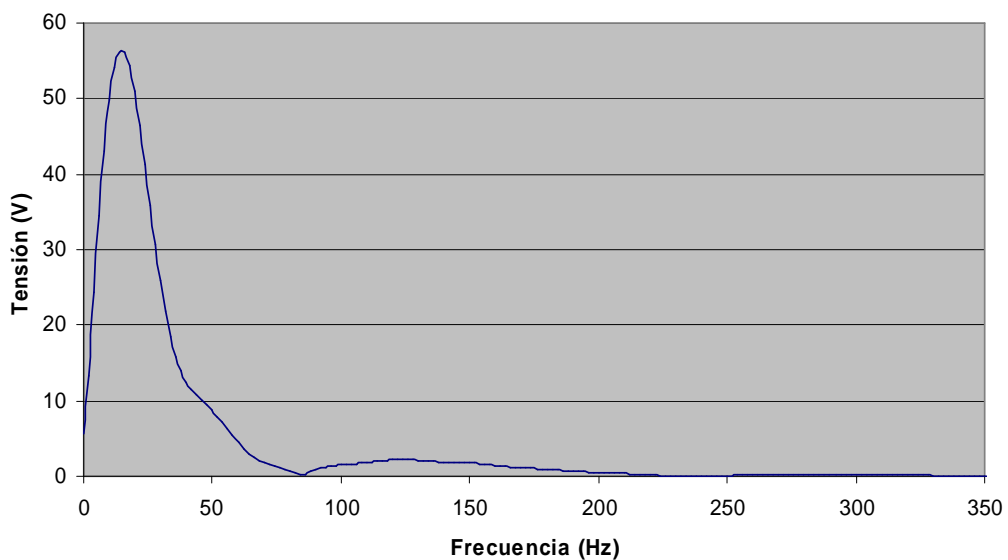
Para concluir con las gráficas de tensión en vacío se puede decir que las formas de onda, que salen en las graficas son trifásicas de carácter senoidal debido a la densidad de flujo magnético que también es de carácter senoidal.

Tal y como se aprecia, la señal no es pura, se ve condicionada por las componentes armónicas de la tensión, dentro de las cuales predominarán los múltiplos impares.

A continuación se muestran unas curvas que representan a los armónicos en conexión triángulo y estrella a 400 rpm.

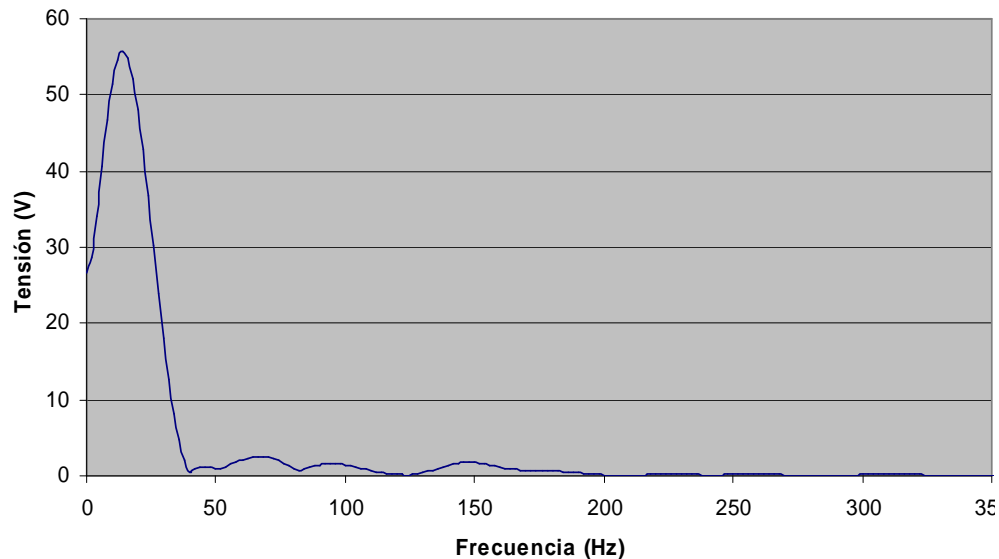
3.14.2.5 EN ESTRELLA Y A 400 RPM.

ARMÓNICOS FASE-NEUTRO ESTRELLA



3.14.2.6 EN TRIANGULO Y A 400 RPM.

ARMÓNICOS TRIÁNGULO



3.14.3. CALCULOS DE PAR COMO GENERADOR CONECTADO EN ESTRELLA.

Se ha podido calcular en la práctica el valor del par resistente que ofrece el generador. Para llevar a cabo ese cálculo se ha procedido a acoplar mecánicamente el generador de imanes permanentes a un motor de continua para llevarlo a su velocidad de sincronismo, es decir 1500 rpm. Una vez que el generador está girando a esa velocidad se han conectado tres resistencias en conexión en estrella de valor 110 ohmios cada una.

El siguiente pasó fue medir la tensión fase en bornes del generador y la corriente que circulaba por una de las fases, de esta forma se obtuvo el valor de potencia activa generada por la máquina.

También se realizó el cálculo del par a diferentes velocidades y con la misma carga y que a continuación se muestran algunos ejemplos:

A 1500 rpm

$$P_{generada} = \sqrt{3} \cdot V_{fase} \cdot I_{fase} \cdot \cos\phi = \sqrt{3} \cdot 202.07 \cdot 1.83 \cdot 0.83 = 531 \text{ W}$$

$$T = \frac{e \cdot idt}{\Omega dt} = \frac{P_{generada}}{\Omega} = \frac{-531}{157.07} = -3.38 \text{ Nm}$$

A 900 rpm

$$P_{generada} = \sqrt{3} \cdot V_{fase} \cdot I_{fase} \cdot \cos\phi = \sqrt{3} \cdot 121.82 \cdot 1.09 \cdot 0.83 = 190.9 \text{ W}$$

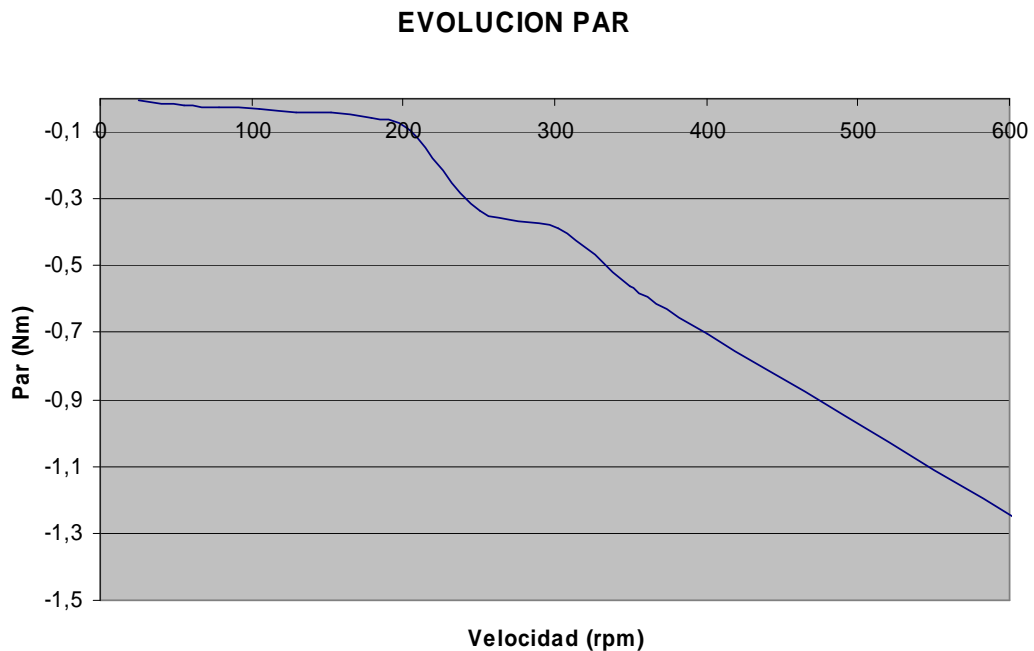
$$T = \frac{e \cdot idt}{\Omega dt} = \frac{P_{generada}}{\Omega} = \frac{-190.9}{94.24} = -2.01 \text{ Nm}$$

A 400 rpm

$$P_{generada} = \sqrt{3} \cdot V_{fase} \cdot I_{fase} \cdot \cos\phi = \sqrt{3} \cdot 53.11 \cdot 0.83 \cdot 0.83 = 30.54 \text{ W}$$

$$T = \frac{e \cdot idt}{\Omega dt} = \frac{P_{generada}}{\Omega} = \frac{-30.54}{41.88} = -0.73 \text{ Nm}$$

A continuación se muestra la gráfica, que es más intuitiva.



3.14.4. CALCULOS DE PAR COMO GENERADOR CONECTADO EN TRIANGULO.

Una vez realizados la conexión del estator en triángulo se procedió de una manera análoga al apartado anterior

Realizando los cálculos analíticos:

A 1500 rpm

$$P_{generada} = \sqrt{3} \cdot V_{fase} \cdot I_{fase} \cdot \cos\phi = \sqrt{3} \cdot 116.66 \cdot 3.83 \cdot 0.83 = 531 \text{ W}$$

$$T = \frac{e \cdot idt}{\Omega dt} = \frac{P_{generada}}{\Omega} = \frac{-531}{157.07} = -3.38 \text{ Nm}$$

A 900 rpm

$$P_{generada} = \sqrt{3} \cdot V_{fase} \cdot I_{fase} \cdot \cos\phi = \sqrt{3} \cdot 70.33 \cdot 1.88 \cdot 0.83 = 190.9 \text{ W}$$

$$T = \frac{e \cdot idt}{\Omega dt} = \frac{P_{generada}}{\Omega} = \frac{-190.9}{94.24} = -2.01 \text{ Nm}$$

A 400 rpm

$$P_{generada} = \sqrt{3} \cdot V_{fase} \cdot I_{fase} \cdot \cos\phi = \sqrt{3} \cdot 64.08 \cdot 1.43 \cdot 0.83 = 30.54 \text{ W}$$

$$T = \frac{e \cdot idt}{\Omega dt} = \frac{P_{generada}}{\Omega} = \frac{-30.54}{41.88} = -0.73 \text{ Nm}$$

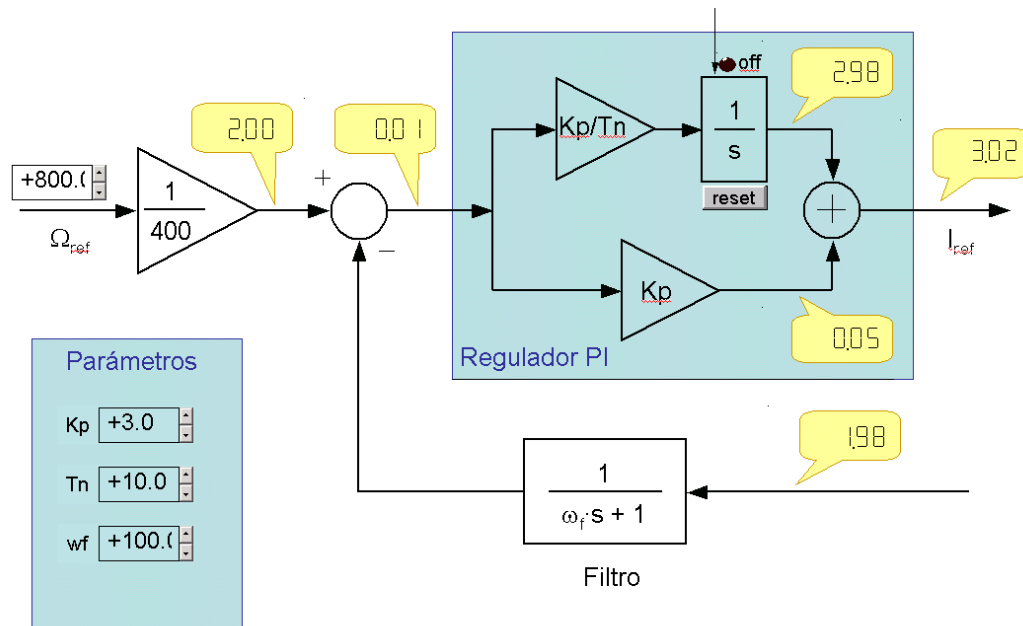
En este caso se observó que la tensión suministrada es raíz de tres veces menor pero la corriente es raíz de tres veces mayor.

En cualquier caso la potencia entregada por la máquina es idéntica independientemente de la conexión que se realice. Cabe comentar que en los ensayos se cambiaba la conexión de las resistencias en función de la conexión que tuviésemos en el estator, es decir si en el estator tenemos estrella las resistencias se conectaban en estrella y lo mismo para el triángulo.

Hay que decir que extrañamente el par resistente en triángulo, incluso en vacío es mayor que en estrella, cuando teóricamente el par debe ser igual (si se cambia la conexión de las resistencias)

3.14.5. ENSAYOS DEL GENERADOR.

Para hacer los ensayos del generador de imanes permanentes se utilizaron dos bancos de pruebas, en uno de ellos mediante la ayuda de un lazo de control, que estaba en el ordenador y que mandaba las ordenes de velocidad al puente en H el cual mandaba más o menos corriente al motor de continua en función de lo que se necesitara en cada momento. A continuación se muestra el lazo de control con el cual se controlaba la velocidad del generador.

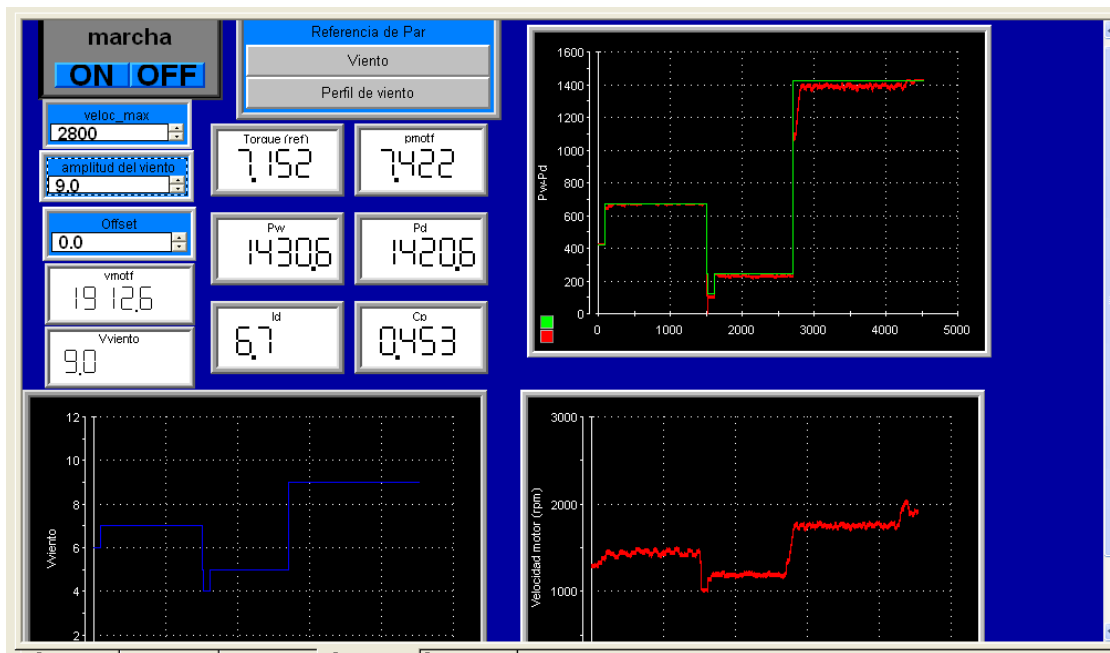


En este esquema se puede observar una casilla en la que se introduce la velocidad de referencia a la cual se manda girar al generador, un regulador PI, un filtro y otras casillas donde se ven los errores con los que trabajaba el lazo en ese instante de tiempo.

Los ensayos realizados en el segundo banco de pruebas fueron más significativos ya que se disponía de una mayor potencia en el motor que hacía las veces de viento y a parte se podía controlar la velocidad de giro del generador con parámetros tan importantes como la velocidad del viento, el par resistente del generador y características de las palas como son λ y C_p .

Este banco consistía en un variador de frecuencia que era el encargado de hacer girar un motor de imanes permanentes que a su vez éste hacía girar a nuestro generador. El variador de frecuencia recibe la señal del ordenador, en el cual hay un programa que se asemeja bastante a la realidad ya que se pueden introducir importantes variables como son características de las palas (curva λ , C_p), velocidad de viento....

A continuación se muestra el programa informático que se usó para realizar éstos ensayos:



En esta imagen se muestran varios parámetros importantes, a parte de las graficas de par, viento y velocidad rotor:

- Velocidad de viento
- Par motor
- Potencia disponible del viento
- Potencia extraída por el generador
- Lambda
- Cp

3.15. COMPARACION TEORIA, JMAG Y REALIDAD.

A continuación, se ha realizado una comparación entre los valores del par teórico y los de JMAG tanto para el motor como el generador con una carga de 110Ω

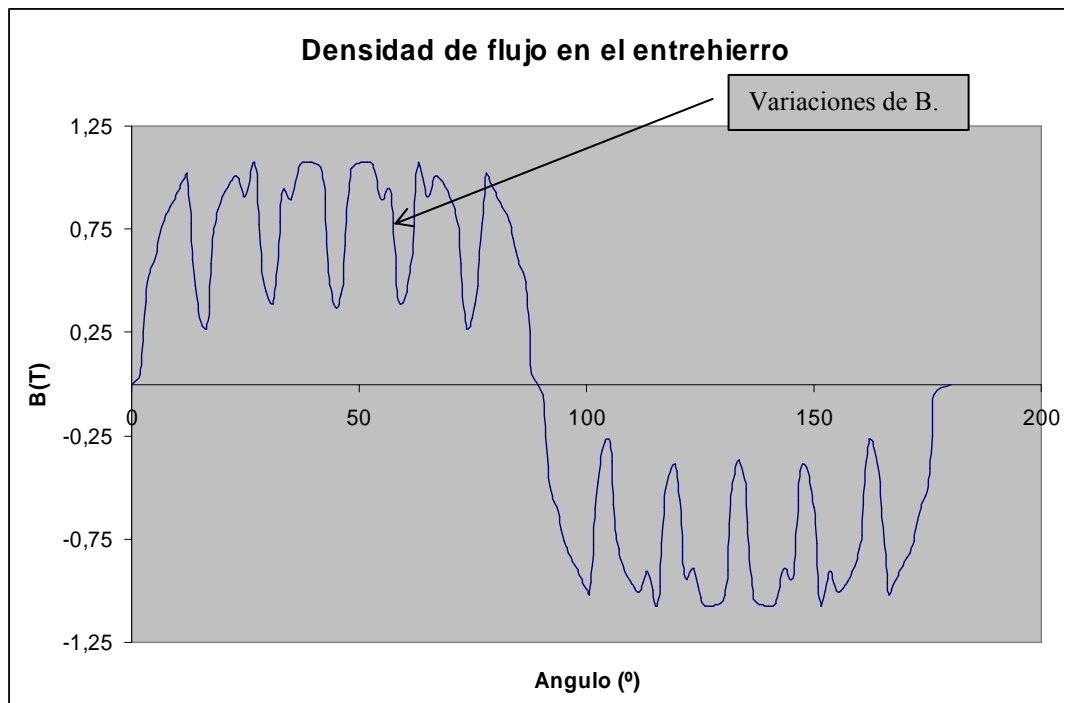
La tabla resumen de los valores es la siguiente:

PAR GENERADO T (Nm)			
TIPO ESTUDIO		MOTOR	GENERADOR
TEORICO		7.42	-3.4
JMAG	SIMULACIÓN	7.49	-3.18
	P.CONSER. DE LA ENERGÍA	7.57	-3.12
REALIDAD			-3.38

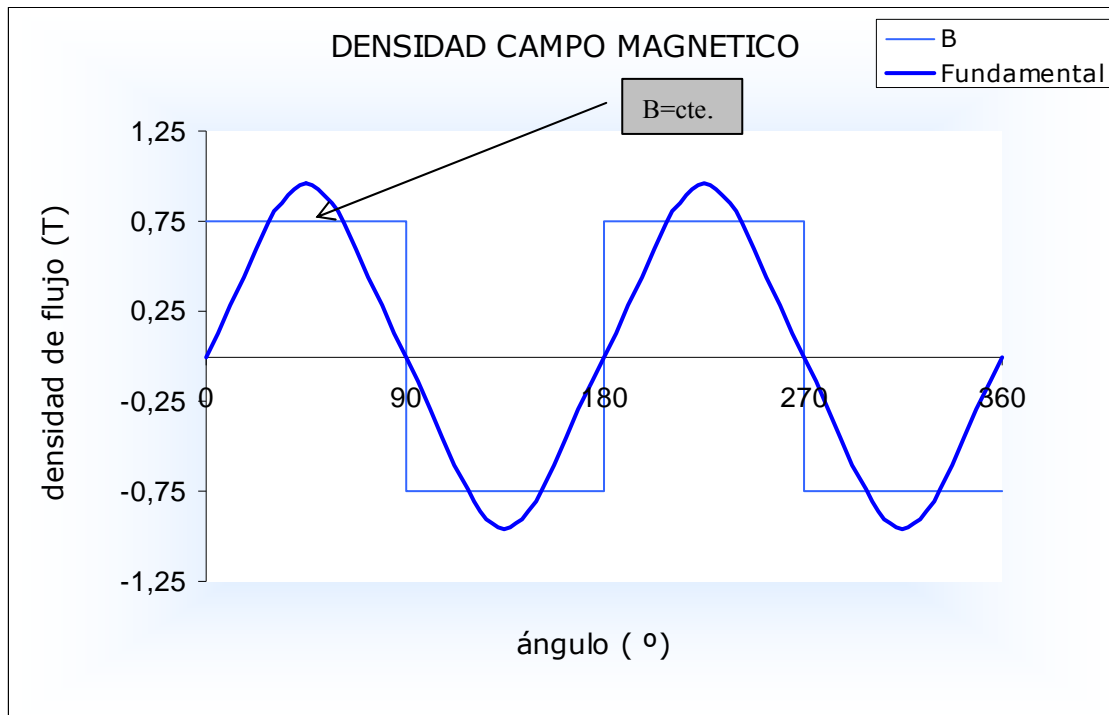
El par esté relacionado directamente con la densidad de flujo magnético por lo que si está ya presentaba diferencia entre unos cálculos y otros, es obvio que el par la presente.

3.15.1. DENSIDAD DE FLUJO EN EL ENTREHIERRO.

Esta imagen es la densidad de flujo en el entrehierro calculada con el JMAG



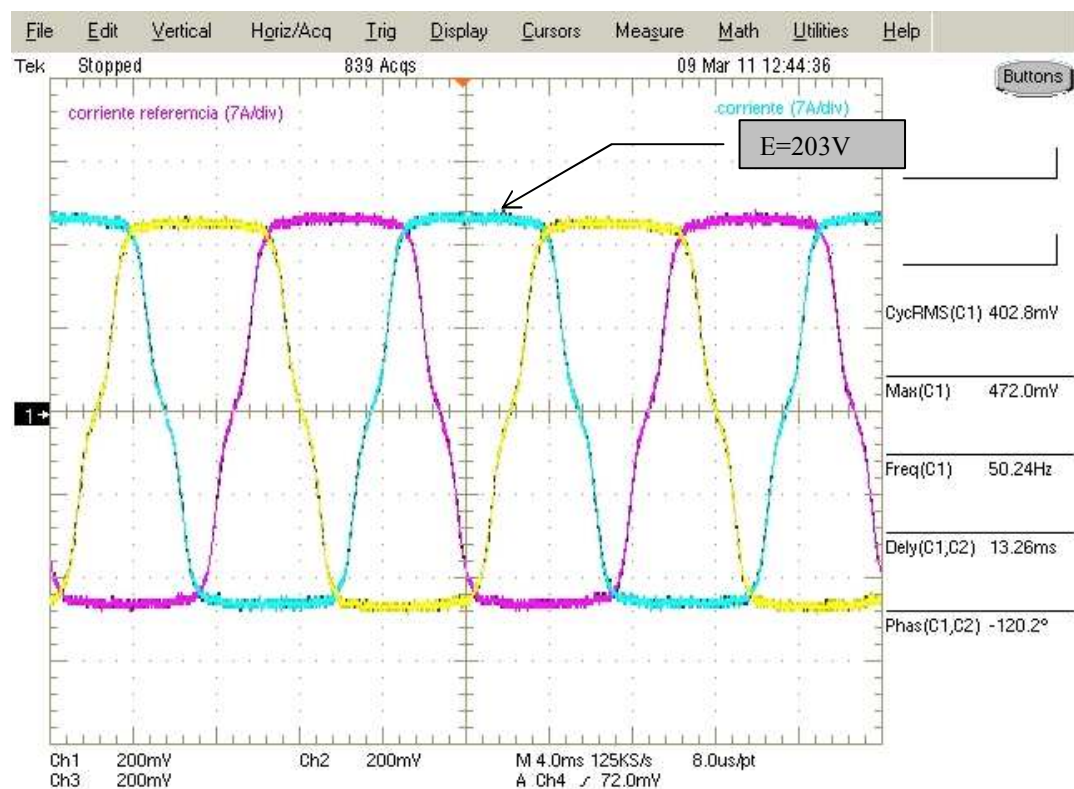
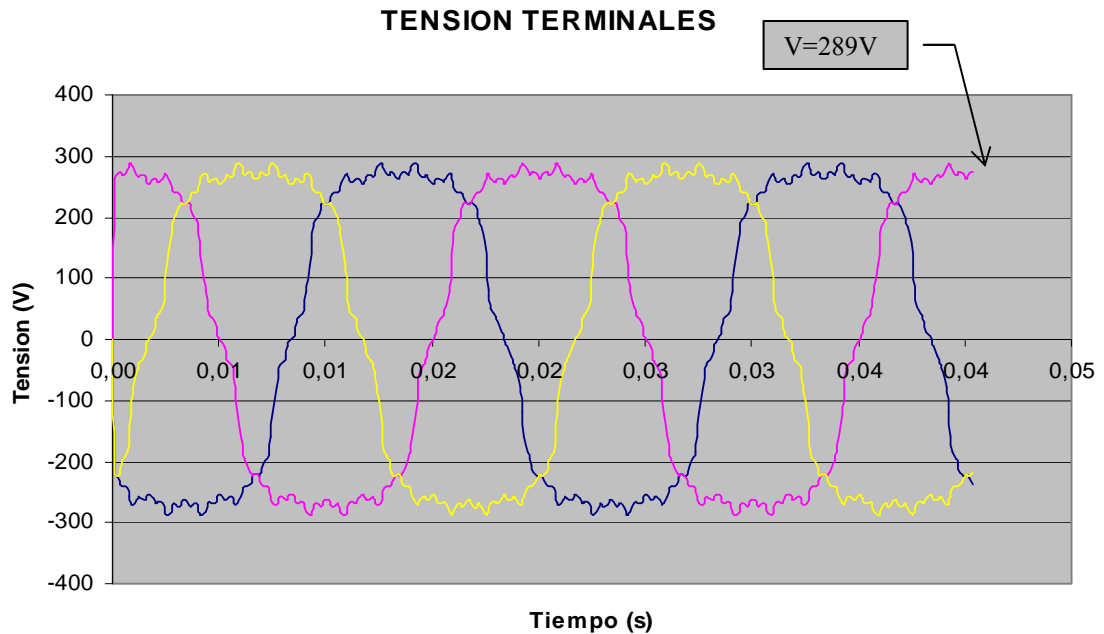
Esta otra grafica es la densidad de flujo en el entrehierro calculada teóricamente.



La forma de onda obtenida en el análisis teórico era de valor constante tanto en el semiciclo positivo como en el negativo por considerarse el espesor del entrehierro constante, es decir sin tener en cuenta las ranuras del estator. Para JMAG, sin embargo, el espesor del entrehierro no es constante debido a que las ranuras están conectadas físicamente con éste. Por lo tanto la forma de onda que se obtiene del simulador no es de valor constante sino que presentará oscilaciones tanto en el semiciclo positivo como en el negativo, referentes a la posición de las ranuras.

3.15.2. TENSIÓN.

A continuación se van a comparar las señales de las tres fases en el JMAG y con el osciloscopio, en estrella, a 1500 rpm y en vacío.



Se observa que las formas de onda tanto del JMAG como las obtenidas con el osciloscopio son prácticamente iguales, la única diferencia reseñable está en la cresta de las ondas, que en el JMAG presenta pequeños picos y con el

osciloscopio no. Esto es debido, a la precisión de JMAG que al ser un programa de simulación realiza cálculos mucho más exactos, esto, unido a la diferencia que existe entre el generador real y el diseñado en el programa de simulación provocan las presentes diferencias. Estas diferencias que se comentan son las propias de traspasar el dibujo de la máquina al programa, ya que es prácticamente imposible ser exactos, siempre habrá pequeñas diferencias como el que en el programa las aristas de los imanes o del hueco de las bobinas son completamente afilados, no siendo así en la realidad que presentan aristas redondeadas. Es algo que ocurre en todos los elementos analizados.

Por otra parte, si JMAG a la hora de hallar la densidad de campo magnético tenía en cuenta la distribución de las ranuras, en la tensión de inducido también se verá reflejada, por lo que tanto en el semiciclo positivo como en el negativo aparecen una serie de ondulaciones.

CAPÍTULO

CONVERSIÓN ELÉCTRICA

4.1. INTRODUCCIÓN.

4.2. POSIBILIDADES.

- 4.2.1. Transformadores
- 4.2.2. Colocar tres circuitos monofásicos
- 4.2.3. Puente Tiristores
- 4.2.4. REDUCTOR DE TENSIÓN
- 4.2.5. Baterías
- 4.2.6. Fase al Aire
- 4.2.7. TAMAÑO DE LAS PALAS
- 4.2.8. IMANES MENOS POTENTES
- 4.2.9. Conexión en Triangulo
 - 4.2.9.1 TERCER ARMONICO EN TRIANGULO
- 4.2.10. REDUCTORA.

4.3. ZONA DE TRABAJO

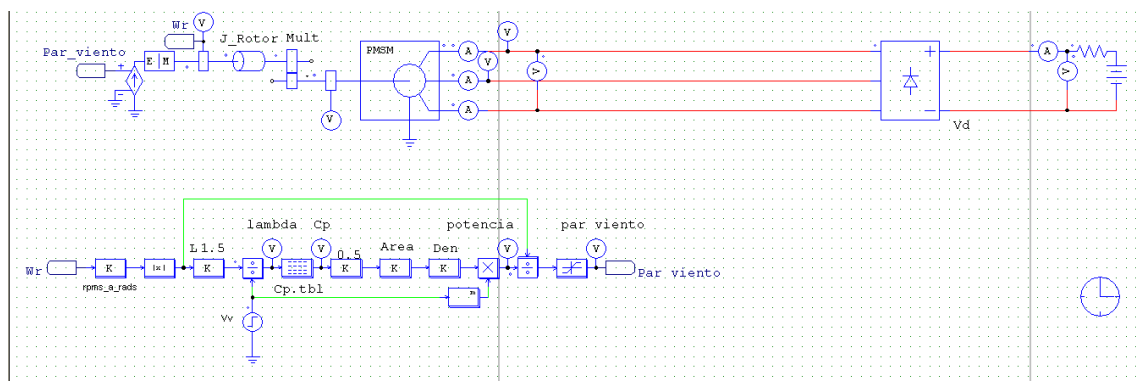
4.1. INTRODUCCIÓN.

Una vez que se construyó el generador de imanes permanentes y se empezaron a hacer pruebas de cómo iba a funcionar en la realidad, es decir con las baterías y el rectificador se comprobó que existía una gran diferencia de tensiones entre la salida del generador y las baterías, lo cual no era muy bueno ya que el generador no llegaba a superar las 60 rpm, es decir la batería imponía su tensión y por consiguiente imponía también la velocidad de giro.

4.2. POSIBILIDADES.

En un principio se pensó en usar simplemente un rectificador trifásico, ya que es la forma más sencilla de convertir la potencia alterna generada por el molino en potencia continua almacenable en baterías.

A continuación se muestran los resultados diferentes que se han ensayado en el PSIM para distintas tensiones de batería.



Rectificador Trifásico	Vv	Lambda	Cp	Pextr	Idc	Irms	Vrotor
12V	4	2,12	0,137	38,7	2,3	1,83	53,9
	6	1,92	0,12	118,2	5,25	4,07	73,5
	8	2,01	0,131	296	9,68	7,35	102,78

Rectificador Trifásico	Vv	Lambda	Cp	Pextr	Idc	Irms	Vrotor
24V	4	3,73	0,27	77,3	2,6	2,1	95,2
	6	3	0,2	193,1	5,48	4,3	115
	8	2,88	0,19	430,5	9,9	7,6	146,8

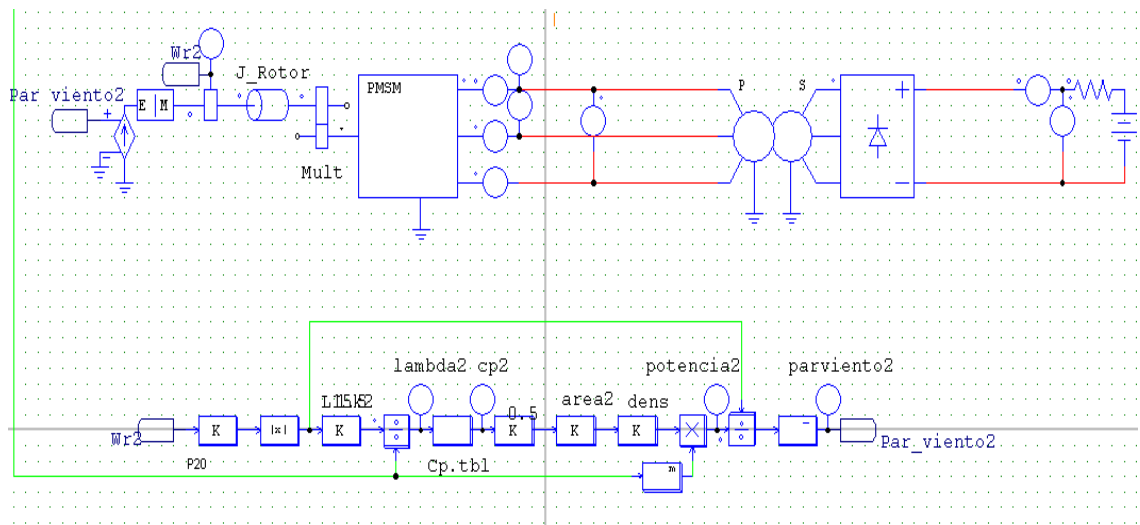
Rectificador Trifásico	Vv	Lambda	Cp	Pextr	Idc	Irms	Vrotor
36V	4	5,28	0,39	110,5	2,6	2,14	134,6
	6	4,22	0,318	303,3	6,21	4,88	161,5
	8	3,92	0,29	66,9	11,35	6,7	199,9

A pesar de que según las simulaciones el sistema opera de manera óptima, en la realidad, según los ensayos realizados en los bancos de pruebas, cuando se hacía girar el generador a unas vueltas tales que la tensión generada era más grande que la de las baterías provocaba que debido a esa gran diferencia de tensión, el rotor no pudiera girar a altas velocidades.

Debido a esta diferencia de tensiones entre la salida del generador y las baterías surge la necesidad de en el que caso de que sea posible, de reducir el voltaje de salida del generador o subir el valor de tensión de las baterías y de ésta manera adaptarlo a las necesidades de la instalación.

De entre las posibles soluciones, se presentarán aquí algunas de ellas:

4.2.1. TRANSFORMADORES.



Transformador	Vv	Lambda	Cp	Pextr	Idc	Irms	Vrotor
12V	4	3,35	0,23	66,4	4,21	2,16	85,3
	6	2,76	0,181	172,8	9,2	4,28	105,6
	8	2,68	0,174	394,2	16,8	7,52	136,5

Transformador	Vv	Lambda	Cp	Pextr	Idc	Irms	Vrotor
24V	4	6,06	0,422	119,3	4,26	2,5	154,5
	6	4,82	0,366	349	10,8	5	184
	8	4,43	0,334	755,9	20	8,98	225,7

Transformador	Vv	Lambda	Cp	Pextr	Idc	Irms	Vrotor
36V	4	8,38	0,318	89,9	2,3	1,47	213,5
	6	6,56	0,441	420,5	9,66	4,61	250,5
	8	5,81	0,412	932,3	18,9	8,57	296,2

La opción más común en una instalación a la hora de reducir el voltaje, es la de colocar un transformador.

Se podría colocar un transformador trifásico o 3 transformadores monofásicos, quizás lo más barato sería colocar 3 monofásicos. El inconveniente de ésta solución es que el transformador es un elemento.

Según la simulación, ésta opción resulta ser adecuada debido al alto valor de c_p que se presenta, aunque en los ensayos realizados en el laboratorio, al conectar un transformador, el sistema se comporta de una manera extraña, ya que sea cual sea la tensión del primario la tensión del secundario es más o menos constante y es de unos 17 V de tensión de línea, (esta tensión es la que impone la batería en el secundario del transformador), con lo cual la corriente de entrada de las baterías se mantiene más o menos constante.

En el esquema se ven dos circuitos, en el de abajo se observa cómo se obtiene el par obtenido del viento a partir de las características de las palas como el C_p , λ , radio pala ...

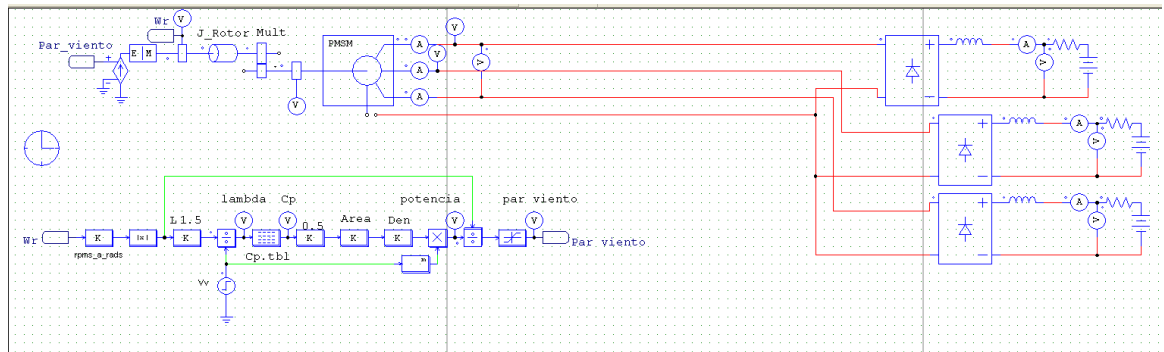
En el circuito de arriba se observa el generador, el transformador trifásico, el rectificador trifásico y la batería.

Ésta solución se descarta principalmente por el inconveniente del peso y del espacio del transformador a la hora de su colocación en lo alto de la torre.

4.2.2. COLOCAR TRES CIRCUITOS MONOFÁSICOS.

Otra de las posibilidades es la de independizar las tres fases del generador, conectando cada una de ellas a un rectificador monofásico, teniendo así a la entrada de cada rectificador monofásico un 66% menos de tensión, logrando así reducir todavía más la tensión entre batería y generador.

En el esquema que se expone a continuación se observan los tres rectificadores monofásicos que están conectados a tres baterías independientes y la inductancia propuesta para independizar los circuitos es de 0,6mH



Inductancia	Vv	Lambda	Cp	Pextr	Idc	Irms	Vrotor
12V	4	3,3	0,23	65,16	1,43	2,4	84,2
	6	2,7	0,179	170	3,67	4,8	104
	8	2,666	0,173	391,5	5,66	8,44	135,7

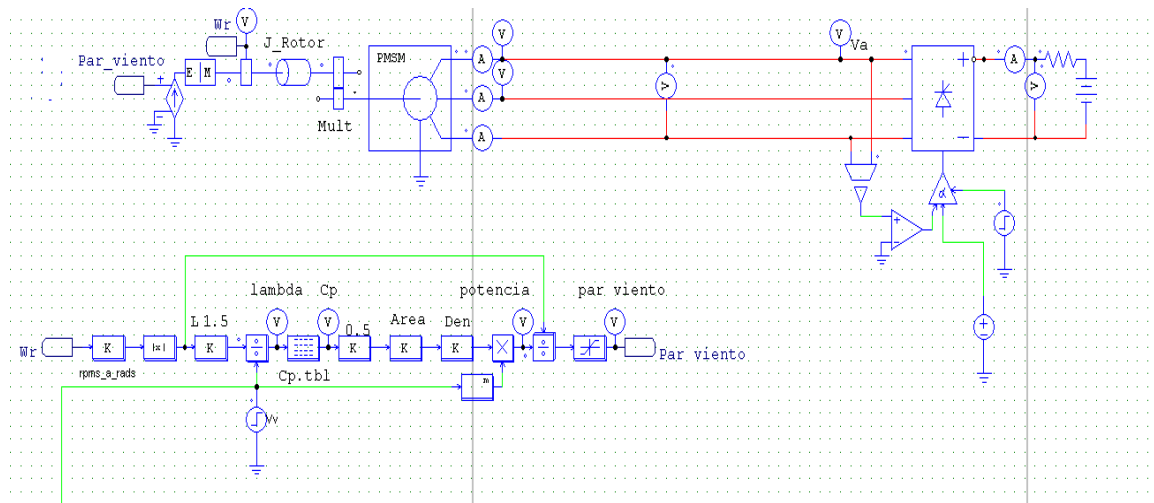
Inductancia	Vv	Lambda	Cp	Pextr	Idc	Irms	Vrotor
24V	4	5,98	0,42	118,4	1,44	2,45	152,3
	6	4,77	0,36	345,2	3,6	5,37	182
	8	4,41	0,33	751,9	6,74	10	224,6

Inductancia	Vv	Lambda	Cp	Pextr	Idc	Irms	Vrotor
36V	4	8,26	0,33	95,17	0,83	1,48	210,5
	6	6,48	0,439	418	3,26	5,25	247
	8	5,78	0,411	929,3	6,36	9,6	294,5

El inconveniente de esto es que hay que independizar las fases hasta el final, (porque si ponemos tres rectificadores monofásicos y una batería es lo mismo que si colocamos un rectificador trifásico y una baterías) es decir, hasta que se almacena la energía en las baterías, teniendo 3 baterías independientes, lo cual obligaría a tener tres inversores, también independientes, lo cual encarecería la instalación. Además, surge en este caso el inconveniente de la bajada de los cables desde el generador o los rectificadores, hasta las baterías, ya que habría que colocar tres anillos rozantes para evitar que se enrollaran con el giro de la góndola.

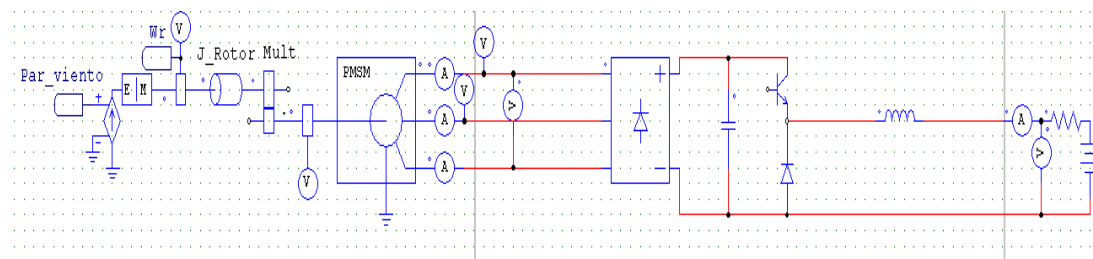
Lo ideal sería independizar las tres fases hasta antes de las baterías para así tener que usar solo un inversor, ahí entran en juego las inductancias, éstas lo que hacen es desacoplar los tres rectificadores monofásicos pudiendo introducir toda la corriente en la batería.

4.2.3. PUENTE TIRISTORES.



Un puente de tiristores es una opción ya que permite disminuir la tensión rectificadora actuando sobre su ángulo de disparo.

4.2.4. REDUCTOR DE TENSIÓN.



Otra forma que se ha pensado para disminuir el exceso de tensión generada por el aerogenerador es usar un regulador de tensión, el cual permite mantener constante la tensión que da a las baterías, independientemente de la tensión que esté generando el molino.

Es decir se comportaría como un transformador pero en el lado de continua, ya que disminuiría la tensión aumentando la corriente, ya que la potencia debe permanecer constante.

Como se ve en la figura de a continuación hay un transistor el cual está conmutando a la frecuencia requerida para sacar la tensión algo mayor que la de las baterías.

El problema está en que hay que dar una serie de órdenes de conmutación al transistor y ahí realmente empiezan los problemas y complicaciones, ya que hay que jugar con la frecuencia y amplitud de la señal triangular y modulante en cada velocidad de viento diferente.

4.2.5. BATERÍAS.

Otra forma de reducir la diferencia de tensión es aumentar el voltaje de las baterías. Hasta ahora se había pensado en colocar baterías en paralelo, para mantener la tensión constante a 12 v aumentando la capacidad de la instalación (Ah), en cambio si se conectan en serie se pueden obtener tensiones como 12, 24, 48 etc.

Una cosa importante a tener en cuenta es que conectes como conectes las baterías la autonomía de la instalación no varía tal y como se observa en el ejemplo.

Para una instalación de 300 w y unas baterías de 100 Ah:

Serie:

$V = 24 \text{ V}$, $I = 100 \text{ Ah}$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{300}{24} = 12.5 \text{ A}$$

$$t = \frac{100 \text{ Ah}}{12.5 \text{ A}} = 8 \text{ horas}$$

Paralelo:

$V = 12 \text{ V}$, $I = 200 \text{ Ah}$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{300}{12} = 25 \text{ A}$$

$$t = \frac{200 \text{ Ah}}{25 \text{ A}} = 8 \text{ horas}$$

4.2.6. FASE AL AIRE.

Ésta simple técnica consiste en dejar una de las tres fases del generador al aire, sin conexión. De esta manera obtendremos una tensión a la entrada del rectificador trifásico de un 33% menos. El inconveniente de ésta técnica es que al dejar una fase al aire el generador está en desequilibrio y produce alguna vibración, es una solución poco ortodoxa pero factible.

4.2.7. TAMAÑO DE LAS PALAS.

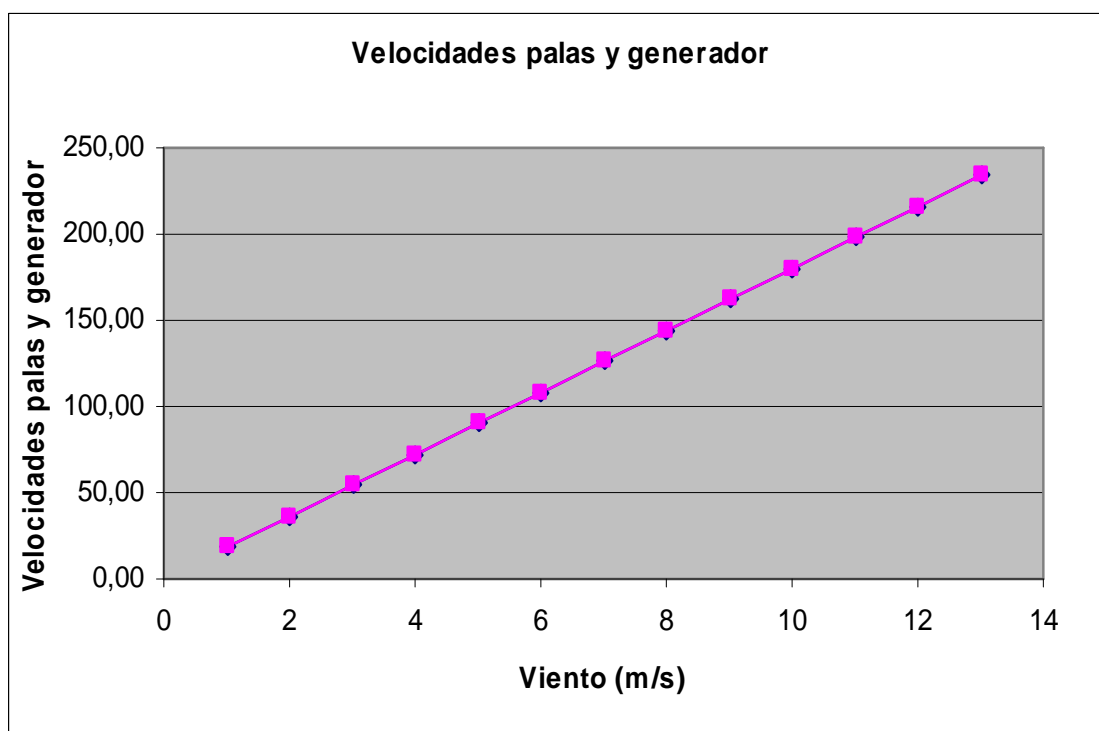
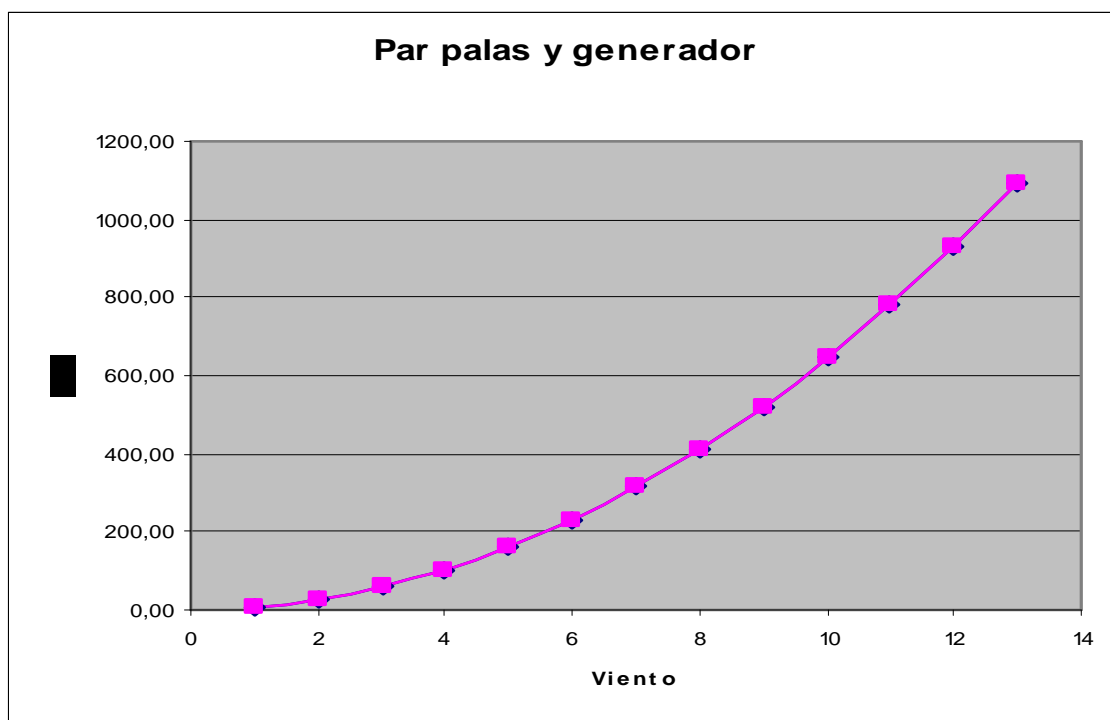
Existe una manera para eliminar la construcción de la reductora, recordemos que la misión de la reductora era disminuir la velocidad de giro del generador y que las palas girasen a su velocidad óptima (C_p y λ óptimos), la solución que se presenta es aumentar el diámetro de las palas o en otras palabras aumentar el radio de la pala.

En el siguiente cuadro se puede observar cual sería el radio de pala necesario para eliminar la reductora:

Velocidad giro palas	Velocidad viento	Radio palas	Lambda	Cp	
108,1052444	6	3,71	7,00	0,450	
Velocidad generado	Vbaterias	Tensión fase (AC)	Par palas		
108,0374487	12	14,62106806	232,19		
Relación reductora					
0,999372874					
		Relación reductora			
		1			
Par entregado palas	Par entregado salida reductora	Velocidad generador	Velocidad palas	Potencia	P
1	6,45	6,445640696	18,02	18,01754073	12,16
2	25,78	25,78256278	36,04	36,03508145	97,29
3	58,01	58,01076626	54,05	54,05262218	328,36
4	103,13	103,1302511	72,07	72,07016291	778,34
5	161,14	161,1410174	90,09	90,08770364	1520,20
6	232,04	232,043065	108,11	108,1052444	2626,90
7	315,84	315,8363941	126,12	126,1227851	4171,42
8	412,52	412,5210045	144,14	144,1403258	6226,73
9	522,10	522,0968964	162,16	162,1578665	8865,80
10	644,56	644,5640696	180,18	180,1754073	12161,59
11	779,92	779,9225242	198,19	198,192948	16187,07
12	928,17	928,1722602	216,21	216,2104887	21015,22
13	1089,31	1089,313278	234,23	234,2280295	26719,00

Se puede ver que para un radio de 3.71 m de pala la relación de la reductora que hay que poner es casi 1, con lo que se eliminaría su fabricación

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Eliminación de la reductora	Fabricación de tres palas enormes
Mayor par de arranque	Complicaciones a la hora del montaje ya que habría que poner el generador al menos a 3.71 m de la base de la torre
Arranque a bajas velocidades de viento	Sobrecarga del generador a velocidades de viento muy pequeñas (tal y como se ve en el siguiente cuadro)



A continuación se muestra otra tabla en la que se puede observar a qué velocidades de viento y con un radio de pala de 3.71 m el generador se empieza a sobrecargar.

4.2.8. IMANES MENOS POTENTES.

Otra forma de disminuir la tensión generada por la máquina de imanes permanentes es usar imanes con menos potencia, eso significa disminuir parámetros como la remanencia del imán o la fuerza coercitiva. Así se consigue menor flujo en el entrehierro y en consecuencia menos voltaje en el estator, por lo que se vería reducida la diferencia de tensión entre batería y generador.

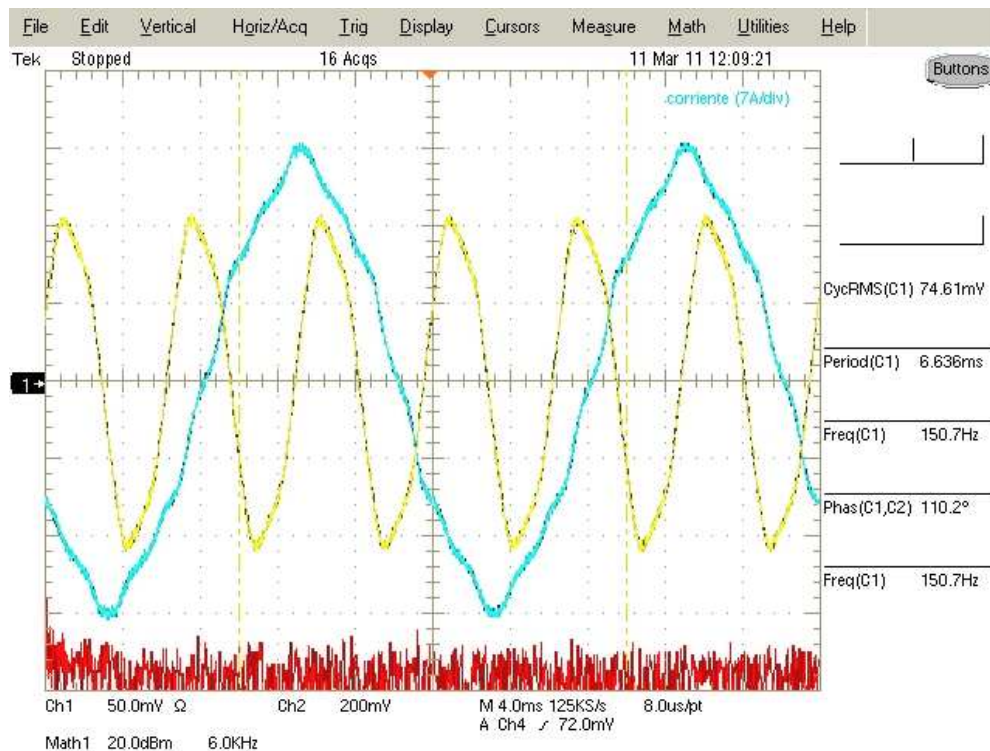
4.2.9. CONEXIÓN EN TRIANGULO.

Al conectar en triángulo el generador, la tensión en bornes es raíz de 3 veces la de la estrella, así pues, con un simple cambio, se consigue rebajar el voltaje de salida. Esto lleva aparejado que la corriente nominal sea mayor, por lo que la potencia será constante.

Este sistema tiene un inconveniente, el tercer armónico que se describe a continuación.

4.2.9.1 TERCER ARMÓNICO EN TRIANGULO.

En la conexión en triángulo, surge otro problema a solventar, el tercer armónico. Al ensayar la máquina se observó la necesidad de aportar mayor par para el movimiento de la máquina en triángulo que en estrella. Esto es debido a que aparecían unas corrientes circulando por el triángulo de la máquina, que al observarlas con el osciloscopio se concretaron como el tercer armónico. En la siguiente figura se ilustra.

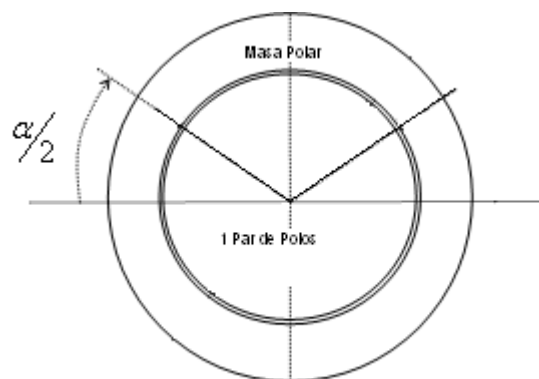


La onda azul es la tensión de las fases en vacío, y la amarilla la corriente que queda circulando dentro del triángulo de 150 Hz.

Esta corriente es la causante de la necesidad de más par para mover la maquina, ya que produce además de un campo magnético giratorio, unas pérdidas de Foucault al estar circulando por el cobre del estator.

Debido a que en este proyecto se optó por modificar solo el rotor de la maquina y dejar el estator como era originalmente, la solución pues, ha de pasar por la parte que se ha modificado.

Para conseguirlo, ha de realizarse la habitual técnica de paso acortado que se realiza en el estator pero esta vez aplicada al rotor.



Para saber exactamente el factor de paso necesario, utilizaremos la siguiente formula:

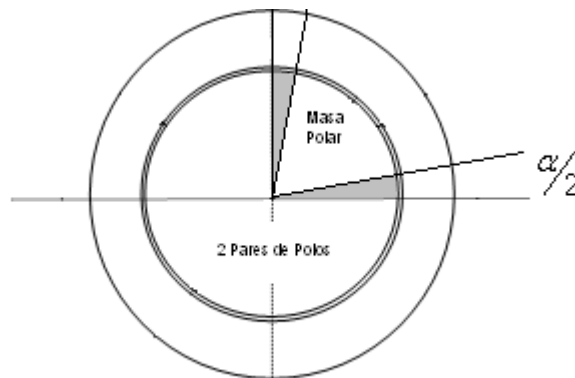
$$k_{pn} = \cos\left(\frac{n\alpha}{2}\right)$$

Para el valor del tercer armónico ($n = 3$) sea cero, el coseno tiene que ser cero, eso se da para un ángulo de 90° . A simple vista se observa que esto sucede para un ángulo de 60° :

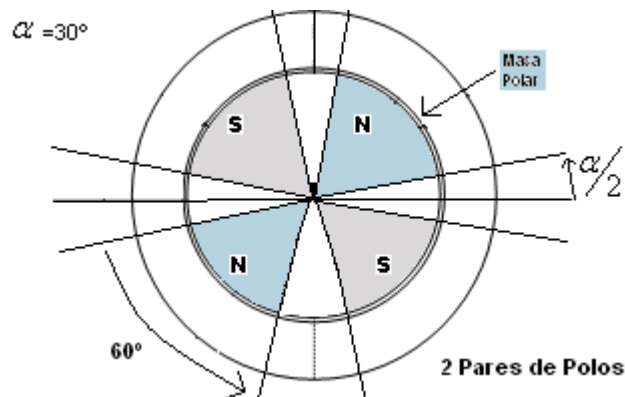
$$k_{pn} = \cos\left(\frac{3 \cdot 60}{2}\right) = \cos(90) = 0$$

Por lo que para un ángulo de 60° se conseguiría anular ese tercer armónico. Esto genera un valor de 120 grados eléctricos para la masa polar.

En este caso, al tener dos pares de polos, tanto el ángulo recorrido por la masa polar como el ángulo del factor de paso habría que dividirlos entre dos para obtener el valor en grados mecánicos. Así pues, se obtienen unos valores de 60 grados mecánicos para la masa polar y de 30 grados para el factor de paso.



El resultado para la maquina completa es:



De ésta forma conseguimos que el tercer armónico se reduzca a cero, pero hay que tener presente que con ésta técnica además de reducir los armónicos, también la componente fundamental se reduce, con el mismo factor de paso.

$$E_{An} = -\frac{4}{\sqrt{2} \cdot n \cdot \pi} \cdot 2 \cdot N_s \cdot B \cdot l \cdot R \cdot \omega \cdot \cos\left(\frac{n\alpha}{2}\right)$$

La componente fundamental, que en los resultados prácticos resulto ser de 203 voltios, quedaría reducido. En la fórmula hay que introducir el valor máximo y no el eficaz que fue el que se midió, de tal forma que el no son 203 sino ese valor multiplicado por raíz de 2, además, al ser la componente fundamental, $n = 1$:

$$E_{An} = 287 \cdot \cos\left(\frac{n\alpha}{2}\right) = 287 \cdot \cos(30^\circ) = 248,6V \text{ de valor máximo.}$$

$$\frac{248,6V}{\sqrt{2}} = 175,8V \text{ eficaces a 1500 rpm.}$$

Al realizar esta técnica, cambian la forma del fresado del rotor, además de ser necesarios menos imanes con la consiguiente reducción económica.

4.2.10. REDUCTORA.

Esta opción no se había tenido en cuenta hasta ahora debido a las incomodidades de creación que presentaba, pero además de ser otra opción válida como solución, en las simulaciones aparenta ser la más adecuada.

La relación de transmisión de la reductora varía en función de unos parámetros como la velocidad de viento, C_p , radio de la pala, λ y tensión de baterías entre otros.

Hay una serie de parámetros que no se pueden modificar, como son los referentes a las palas, ya que éstas ya están fabricadas, el único parámetro que se puede modificar es la tensión de almacenamiento o de baterías, pudiendo ser 12 o 24 V.

En el caso que se decida poner una tensión de baterías de 12 V la relación de la reductora será más pequeña lo que implicará una menor velocidad y un mayor par a la salida de la reductora.

Para el caso que se quiera colocar una tensión de baterías de 24 V la relación de la reductora será algo mayor, lo que se traducirá en una velocidad más alta y un par más pequeño en la salida de la reductora.

Las palas construidas tienen una velocidad de giro en la cual extraen la máxima potencia posible del viento, ésta velocidad óptima es diferente para diferentes velocidades de viento. A continuación se muestra la velocidad óptima de las palas para la velocidad media a la cual van a estar trabajando, que es 6 m/s.

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_{viento}}$$

Despejando la velocidad de las palas:

$$\Omega = \frac{\lambda \cdot V_{viento}}{R_{pala} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}} = \frac{7 \cdot 6}{1.5 \cdot \frac{2\pi}{60}} = 267 \text{ rpm}$$

Con esta velocidad de las palas, sin reductora, se consiguen en el generador, gracias a los ensayos, 36 voltios, una vez rectificadas, las baterías verían:

$$V_{dc} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{linea} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot 62.35 = 75 \text{ V}$$

Por lo que para que la instalación fuera óptima en la velocidad media del viento, habría que colocar unas baterías de 72 voltios. Debido a la imposibilidad en este proyecto de disponer de esas baterías, se hace el proceso inverso, es decir, para este caso se disponen de dos baterías de 12 voltios, o bien de una posible asociación de manera que se obtengan 24 voltios.

Según esto, y estableciendo una tensión una vez rectificada algo mayor para que haya una diferencia de potencial, establecemos la siguiente relación:

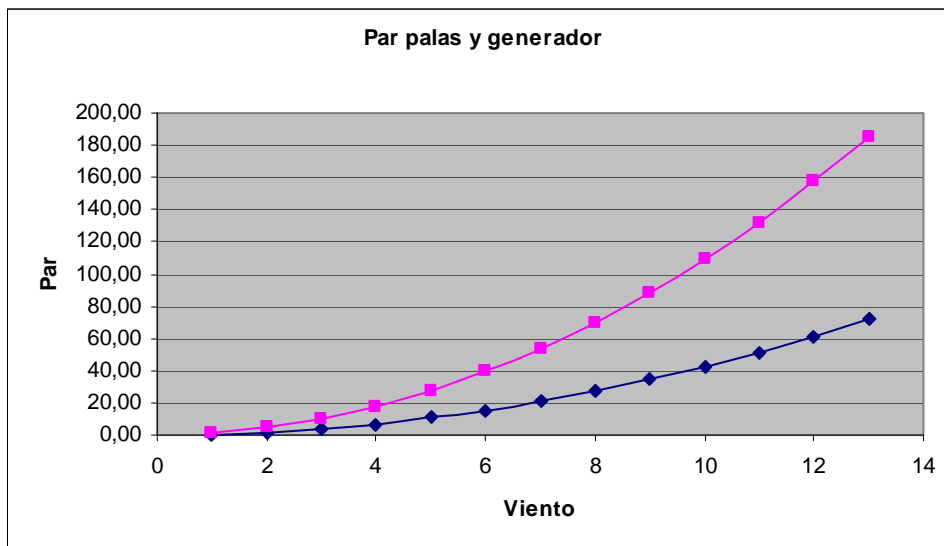
$$V_{linea} = \frac{V_{dc}}{\frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi}} = \frac{22 + V_{bat}}{1.35} = 25.18 \text{ V}$$

Gracias a los ensayos realizados al generador de imanes permanentes, se sabe que esos 14.54 voltios de fase se consiguen en el generador a 106 rpm.

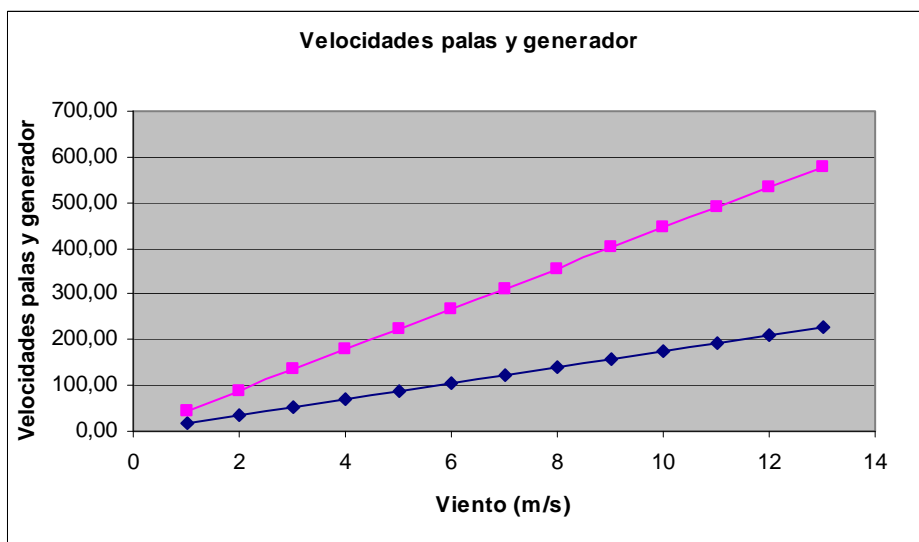
Llegados a éste punto tenemos dos velocidades diferentes, una en las palas y otra en el generador, entonces el elemento que se colocará entre los dos será una reductora mecánica, la relación se calcula de la siguiente forma:

$$i = \frac{rpm_conducida}{rpm_conductora} = \frac{106}{267} = 0.39$$

En la gráfica que se muestra a continuación se puede observar la evolución del par entregado por las palas en la entrada a la reductora y el par a la salida de la misma. Para una relación de 0.39.



En esta otra gráfica se observa la evolución de la velocidad de las palas y la velocidad en la salida de la reductora para una relación de 0.39



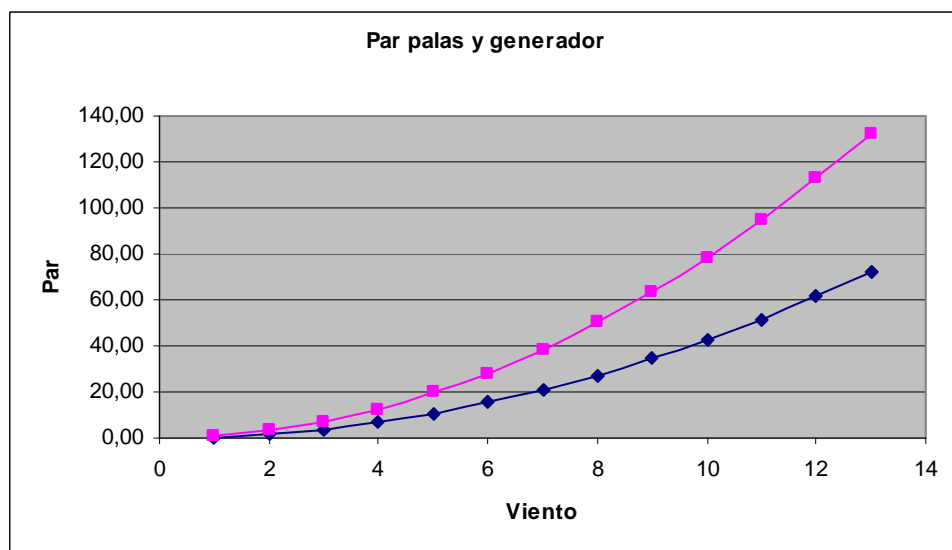
Para el caso de 24 voltios de baterías y procediendo de igual manera se obtiene una relación de:

$$V_{linea} = \frac{V_{dc}}{\frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi}} = \frac{22 + V_{bat}}{1.35} = 34.07 \text{ V}$$

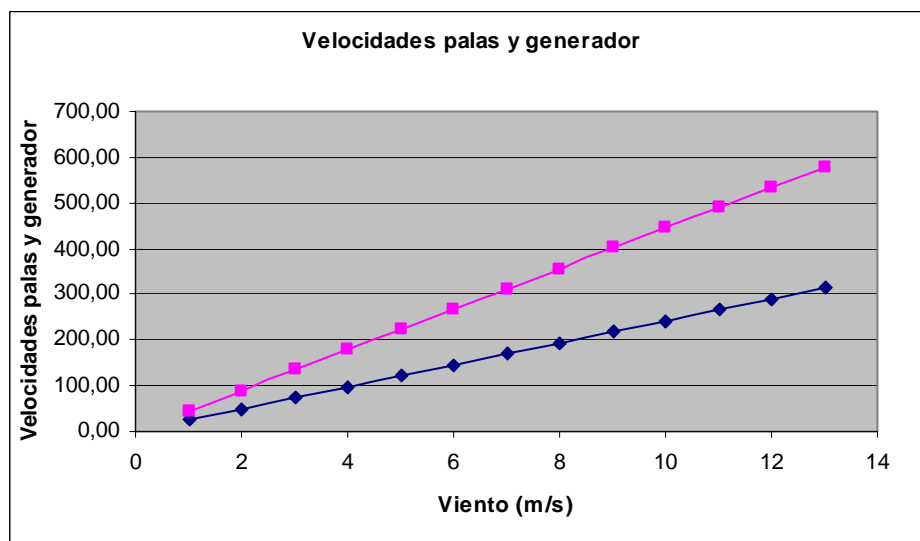
Estos 19.67 V de fase corresponden a 145 rpm, siendo la relación de reducción de:

$$i = \frac{rpm_conducida}{rpm_conductora} = \frac{145}{267} = 0.544$$

En la gráfica que se muestra a continuación se puede observar la evolución del par entregado por las palas en la entrada a la reductora y el par a la salida de la misma. Para una relación de 0.544.



En esta otra gráfica se observa la evolución de la velocidad de las palas y la velocidad en la salida de la reductora para una relación de 0.544.



A continuación se muestran los resultados de la simulación:

Para 12 voltios y reductora de 0.40.:

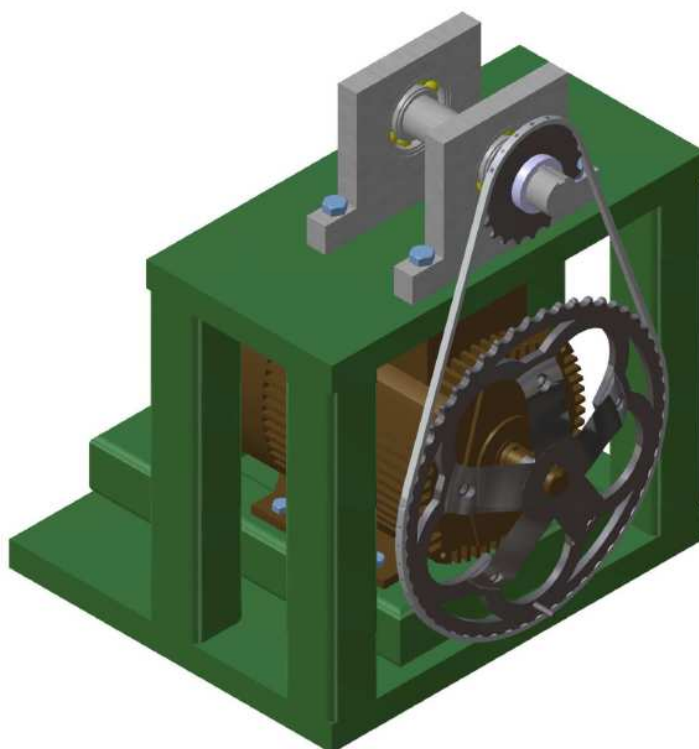
Reductora 0,40	Vv	Lambda	Cp	Pextr	Idc	Irms	Vrotor
12V	4	5,11	0,38	108,6	5,05	3,93	71,7
	6	5,4	0,396	377,7	11,37	8,58	113,6
	8	6,3	0,43	975	20	14,9	176,2

Para 24 voltios y reductora de 0.55:

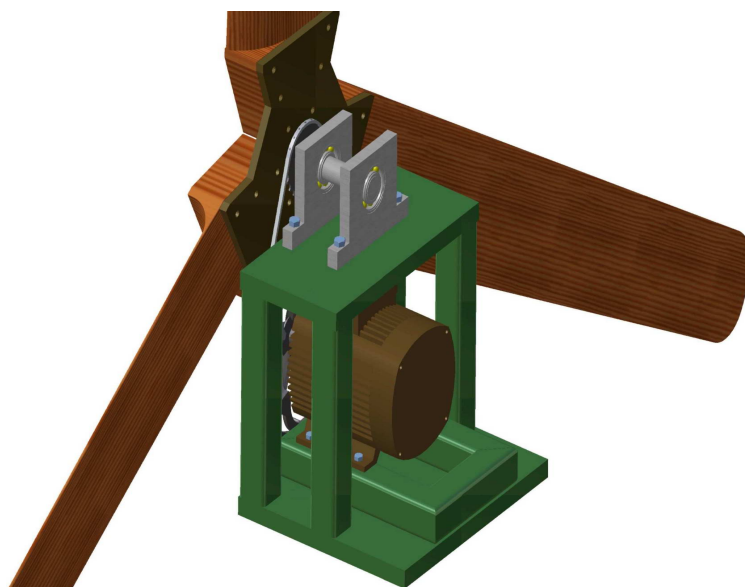
Reductora 0,55	Vv	Lambda	Cp	Pextr	Idc	Irms	Vrotor
24V	4	7,4	0,426	120,4	3,78	3	103,5
	6	6,97	0,449	428,4	9,89	7,57	146,5
	8	7,19	0,438	989,7	17,46	13,1	201,6

Una ventaja importante de la reductora es que permite eliminar el peso de las palas y buje del eje del generador, ya que éste peso estará ahora soportado por el nuevo buje que compone la reductora. Se ha visto en algún libro que los motores no están preparados para colgar pesos de su eje ya que con el tiempo acaban por coger holguras, incluso llegando a rajar el estator.

A continuación se muestra un diseño de la reductora junto con el generador que se ha realizado para saber como va a quedar una vez que se construya:



Todo el sistema montado, es decir con las palas, generador y la reductora:



En estas otras fotografías se observa el plato y el piñón utilizado para formar la reductora, cabe decir que son materiales reciclados y por lo tanto con un precio de costo de 0 euros.



4.3. ZONA DE TRABAJO.

Más que una mejora es una visualización global del sistema palas-generador. Gracias a la tabla y la gráfica, se visualiza la zona de trabajo del generador. Esto ayuda a saber que variables se pueden modificar en el sistema para obtener una instalación más acorde a las necesidades.

En este caso se usan los datos del proyecto:

Nº espiras por fase: 154

Nº ranuras: 3

Corriente Máxima: Estrella: 10 A

Triangulo 17,2 A

Factor de potencia: 0,88

Radio de las palas: 1,5 m.

Cp: 0,45.

Lambda: 6.

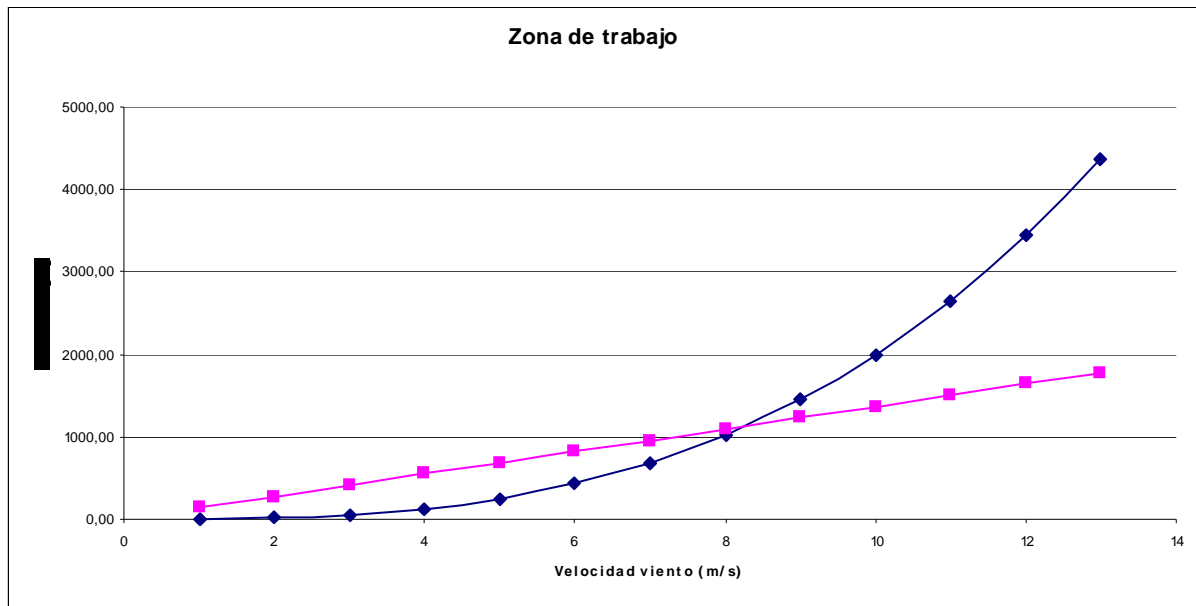
Pares de polos: 2

Velocidad del viento (m/s)	Par entregado palas	Velocidad de giro(rpm)
1	0,497010938	38,20
2	1,98804375	76,39
3	4,473098438	114,59
4	7,952175	152,79
5	12,42527344	190,99
6	17,89239375	229,18
7	24,35353594	267,38
8	31,8087	305,58

9	40,25788594	343,77
10	49,70109375	381,97
11	60,13832344	420,17
12	71,569575	458,37
13	83,99484844	496,56

Potencia máxima extraíble	Tensión vacío fase-neutro (V)	Tensión línea (V)	Potencia máxima generador
1,99	5,18	8,97	136,76
15,90	10,36	17,95	273,53
53,68	15,54	26,92	410,29
127,23	20,72	35,89	547,06
248,51	25,90	44,86	683,82
429,42	31,08	53,84	820,59
681,90	36,26	62,81	957,35
1017,88	41,44	71,78	1094,12
1449,28	46,62	80,76	1230,88
1988,04	51,80	89,73	1367,65
2646,09	56,99	98,70	1504,41
3435,34	62,17	107,67	1641,18
4367,73	67,35	116,65	1777,94

Corriente rectificadora	Tensión rectificadora en vacío	Potencia salida rectificador
0,165670313	12,11762024	1,99
1,3253625	24,23524049	15,90
4,473098438	36,35286073	53,68
10,6029	48,47048097	127,23
20,70878906	60,58810122	248,51
35,7847875	72,70572146	429,42
56,82491719	84,8233417	681,90
84,8232	96,94096195	1017,88
120,7736578	Generador en sobrecarga	Generador en sobrecarga
165,6703125	Generador en sobrecarga	Generador en sobrecarga
220,5071859	Generador en sobrecarga	Generador en sobrecarga
286,2783	Generador en sobrecarga	Generador en sobrecarga
363,9776766	Generador en sobrecarga	Generador en sobrecarga



Así pues, se visualiza en la gráfica anterior, para unas determinadas variables, las velocidades del viento para las que el viento da más potencia que la que puede suministrar el generador y por lo tanto, las velocidades del viento para las que la instalación no sufre ningún problema y para las que está zona indeseada.

Al cambiar valores como el radio de las palas, la conexión del generador, etc, se obtendrá una zona diferente y por lo tanto velocidades de viento aprovechables diferentes.

CAPÍTULO

5

ACUMULACIÓN Y CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA

5.1 BATERÍAS.

5.2. RECTIFICADOR TRIFASICO.

5.3. BAJADA DE CORRIENTE

5.4. NECESIDADES DE LA INSTALACIÓN.

5.5. AUTONOMÍA DE LA INSTALACIÓN.

5.6. REGULADORES.

5.7. CUADRO DE CONTROL

5.8. CONVERTIDORES CC/CA.

5.1 BATERÍAS.

5.1.1. INTRODUCCIÓN.

La corriente que se genera en el aerogenerador puede seguir dos caminos, consumirse en el acto o acumularse.

Una instalación eólica tiene unos acumuladores para permitir almacenar la energía eléctrica generada por el aerogenerador para los días en los que no haya generación de energía y para mantener constante el voltaje de la instalación.

Se le denomina batería al dispositivo que almacena energía eléctrica, usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad. Se trata de un generador eléctrico secundario, es decir, un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga.

Existen diferentes tipos de baterías, Baterías de iones de litio (Li-ion), Baterías de polímero de litio (LiPo), Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH), Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd), Batería alcalina, y las más económicas y frecuentes, las de plomo.

Las baterías de plomo, están formadas por varias celdas. Ya que cada celda proporciona dos voltios, se comprende que las baterías de seis voltios tengan tres celdas (tres tapones), y las de doce voltios, seis celdas (seis tapones).

Los huecos de la rejillas positivas, se llenan con óxido de plomo (PbO_2) o minio (Pb_3O_4) y los de las placas negativas, con plomo esponjoso (Pb), o litargirio (PbO). Todo el conjunto, va sumergido en una disolución de ácido sulfúrico en agua (electrolito), de concentración adecuada.

En estas placas o rejillas se incluyen sustancias difusoras o expansoras, en pequeñas cantidades para impedir la contracción y solidificación del plomo esponjoso, con lo que perdería capacidad y vida la batería.

Los separadores, son las piezas que tal y como su nombre indica mantienen separados las placas que tienen como finalidad impedir el contacto físico de las placas de distinta polaridad, para impedir que se produzcan los temibles cortocircuitos.

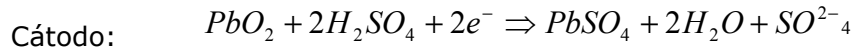
Por su forma ondulada o ranurada, permiten la conducción libre del electrolito por toda la superficie de las placas.

Los separadores suelen estar fabricados de diferentes materiales como: plástico poroso, papel microporoso especial, lana de vidrio impregnada en resina, etc....

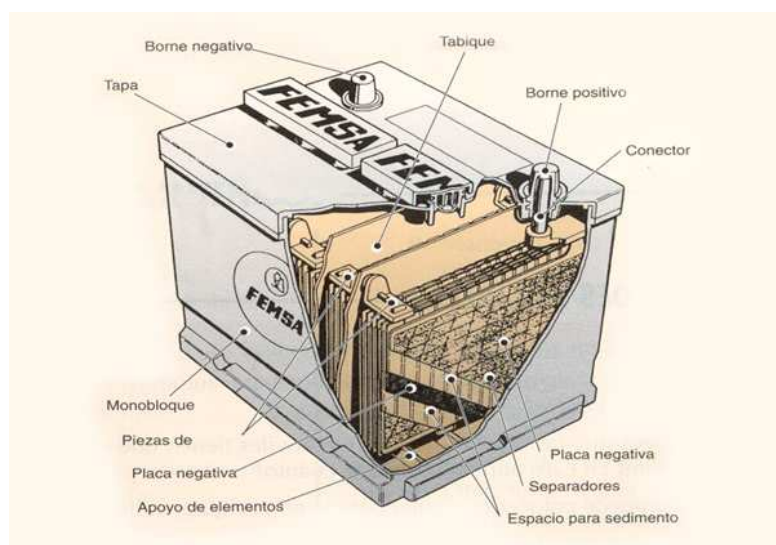
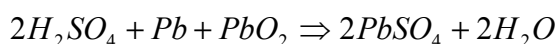
El electrolito se consigue mezclando agua destilada con ácido sulfúrico en una concentración del 34% de ácido, el cual adquiere una densidad de 1,28, densidad que hay que vigilar y corregir añadiendo agua, ya que ésta se evapora sobre todo en estaciones cálidas.

Durante la descarga, se va consumiendo y diluyendo el ácido sulfúrico del electrolito y se forma sulfato de plomo sólido y agua. En la descarga baja la concentración del ácido sulfúrico, porque se crea sulfato de plomo (II) y aumenta la cantidad de agua liberada en la reacción. Como el ácido sulfúrico concentrado tiene una densidad superior a la del ácido sulfúrico diluido, la densidad del ácido puede servir de indicador para el estado de carga del dispositivo.

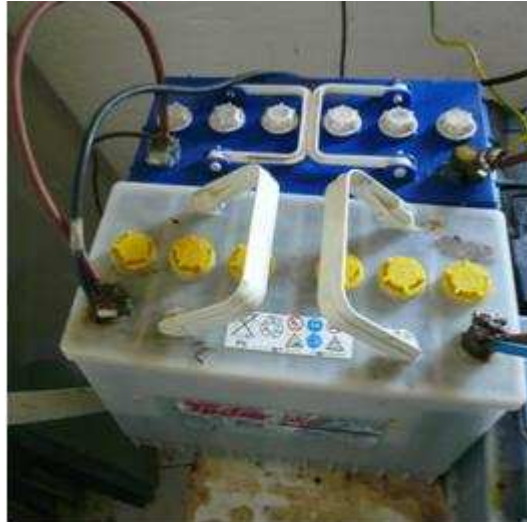
Al cargar la batería, suceden las mismas reacciones en sentido opuesto. Las reacciones son las siguientes:



La reacción Global es:



Las baterías que se consiguieron para el almacenamiento de la energía generada por las placas y el aerogenerador son procedentes de un autobús. Es decir de un tamaño considerable. Tal y como muestra la fotografía siguiente:



La conexión de las baterías es en paralelo lo que se quiere conseguir con esa conexión es mantener la tensión del conjunto a 12 V y que los amperios hora de las baterías se sumen y formen una especie de gran acumulador. Es importante que la tensión del conjunto de las baterías sea de 12V porque el inversor, que será el encargado de convertir la energía acumulada en las baterías en AC, se alimenta a tensión continua de 12V. Vemos en la pegatina de la batería que su tensión nominal es de 12V y tiene unos 108 amperios hora.

Podemos definir amperios hora a la cantidad de energía eléctrica que pasa por los terminales de la batería si ésta proporciona una corriente eléctrica de un amperio durante una hora, es decir éstas baterías son capaces de entregar 108 amperios en una hora y como están en paralelo la corriente que suministraran será de 216 A.



5.1.2. SUSTITUCIÓN DE LAS BATERÍAS.

En el proceso de cambio se tendrán en cuenta las siguientes fases:

Desconectar en primer lugar el borne negativo (-).

Una vez quitada la batería, revisar el estado de corrosión de la bandeja donde se coloquen las baterías y piezas de sujeción, las partes atacadas por el ácido pueden lavarse con bicarbonato o amoníaco disuelto en agua, una vez secas las partes de acero dañadas, pintar con pintura anticorrosiva.

Revisar los cables y terminales, en caso necesario sustituir o reparar.

Colocar la nueva batería, o la antigua, totalmente cargada, perfectamente en su alojamiento.

Verificar la polaridad de los cables y de la batería. Si se invierte la polaridad, se estropearían las demás baterías.

Conectar los cables a los bornes de la batería, teniendo en cuenta que el cable de masa (-) será el último en conectarse.

Una cosa importante a tener en cuenta es que nunca se deberá añadir ácido al electrolito ya que esto dañaría de forma irreversible las placas

5.1.3. COMPROBACIÓN CON POLÍMETRO.

Por medio de un polímetro (seleccionando el modo voltaje), podemos determinar el estado de carga de la batería. Las medidas las tomaremos con la

batería en vacío, es decir sin conectar a ninguna carga. Los valores de carga de la batería vienen determinados por la tensión en vacío medida entre bornes, los datos están recogidos en la siguiente tabla:

TABLA TENSIÓN-CARGA

<u>Tensión batería</u>	<u>Estado de carga</u>
Mayor o igual a 12,60.....	100%
De 12,50 a 12,45.....	80%
De 12,35 a 12,25.....	50%
De 12,15 a 12,00.....	25%

Durante la carga podemos comprobar el estado de la batería procediendo del siguiente modo:

Conectar la batería a un cargador y seleccionar la intensidad recomendada por el fabricante, sin desconectar el cargador de la batería medir la tensión en bornes, transcurridos tres minutos desde el inicio de carga, si la tensión es igual o superior a 15,5 V la batería es defectuosa.

Si al conectar la batería al cargador procediendo a su carga a la intensidad adecuada el amperímetro no indica carga, es síntoma de que la batería está en mal estado por falta de continuidad interna.

Una vez concluida la carga de la batería y en estado de reposo (se considera reposo cuando ha estado cuatro o más horas desconectada del cargador), medir la tensión en bornes, si es inferior a 12,7 V la batería es defectuosa.

5.1.4. SÍNTOMAS DE UNA BATERÍA CARGADA.

La tensión va aumentando durante la carga, pero cuando la batería está cargada deja de aumentar.

La densidad que también va aumentando durante la carga, cesa de aumentar cuando la operación está terminada.

El desprendimiento de gases que se verifica durante toda la carga se acentúa al final de ella, formándose unas gotitas alrededor de los respiraderos de los vasos.

5.1.5. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VIDA DE LAS BATERÍAS:

5.1.5.1 Sobrecarga.

Si la batería está cargada y continúa recibiendo carga, este exceso de intensidad descompone el agua y hace que disminuya el nivel del electrolito. La sobrecarga de la batería da origen a:

Fuerte corrosión de las rejillas positivas, con el consiguiente debilitamiento mecánico, dificultando la conducción eléctrica.

Concentración del electrolito que deteriora los componentes de los elementos, sobre todo, a altas temperaturas.

Deformaciones en las rejillas positivas, sobre todo, si la batería permanece descargada durante un tiempo prolongado.

Corrosión en el alojamiento de la batería, en los cables, etc.

4.1.5.2 Carga Insuficiente.

La batería sometida durante largo periodo de tiempo a una carga insuficiente para su mantenimiento, no solamente es incapaz de suministrar su potencia completa cuando sea requerida, sino que, puede formar en sus placas un tipo de sulfato duro, denso y cristalino que no podrá volver a transformarse por acción electroquímica en materia activa normal.

Este tipo de sulfato se produce especialmente cuando la batería es sometida a una descarga prolongada sin carga.

También cuando el sistema regulador del generador se encuentra mal tarado y las descargas repentinas y prolongadas son excesivas en un determinado momento.

Como consecuencia, aparecen tensiones internas en las placas produciendo alabeos en ellas, con peligro de que aparezcan perforaciones en los separadores y cortocircuitos entre las placas.

5.1.5.3 Falta de Agua.

Durante el proceso de carga de la batería se pierde agua, en forma de hidrogeno y oxigeno, que hay que reponer, consiguiendo que el nivel del electrolito no esté por debajo del mínimo admisible.

De no ser así, el electrolito alcanzara una alta concentración que puede perjudicar a los separadores.

Por otra parte, si las placas dejan de estar cubiertas por el electrolito se sulfatarán irreversiblemente, no pudiendo por tanto devolver la energía que disponía inicialmente.

El ácido sulfúrico no se añade nunca a la batería no ser que se haya derramado el electrolito.

5.1.6. BATERÍAS DE BAJO MANTENIMIENTO.

Las nuevas técnicas empleadas para la fabricación de placas y separadores permiten obtener rejillas con un menor contenido en antimonio, y separadores más delgados, con mayor porosidad, lo cual supone una serie de ventajas sobre las baterías hasta ahora conocidas.

Estas ventajas se pueden resumir en:

Menor autodescarga en reposo.

Mayor duración útil de servicio.

Mejores prestaciones para el arranque.

Mayor fuerza electromotriz en bornes.

Menor consumo de agua.

Mayor resistencia mecánica.

Menor mantenimiento.

En las baterías sin mantenimiento se ha sustituido la aleación plomo-antimonio de las placas por las de plomo-calcio, lo que elimina la corrosión interna en un 80%. Además de aumentar las ventajas antes citadas.

5.1.7. CARGA BATERÍAS.

5.1.7.1 Precauciones a tener en cuenta en la carga de baterías.

Antes de iniciarse la carga deben de observarse las siguientes precauciones:

La sala de carga debe ser fresca y existir una ventilación suficiente.

Limpiar los bornes y terminales, teniendo cuidado de no introducir residuos en el interior de los vasos.

Comprobar el nivel del electrolito y rellenar en caso necesario, con agua destilada o desmineralizada, hasta el nivel correcto (de 10 a 15 mm por encima de las placas).

Cuando se carguen varias baterías a la vez, se conectarán en serie, teniendo en cuenta que la tensión total será suma de todas las baterías.

Cuando se carguen varias baterías en serie de distinta capacidad se seleccionará la intensidad de carga respecto a la de menor capacidad.

Sin alimentar el cargador, conectar los bornes (+) y (-) a las pinzas correspondientes, teniendo cuidado de no invertir las conexiones.

No acercar ninguna llama a los orificios de llenado y ventilación de la batería, pues hay riesgo de explosión debido al gas de hidrogeno.

Durante el proceso de carga, las baterías deben de permanecer con los tapones quitados y la temperatura del electrolito no debe pasar de 50 C, tomada en un vaso central.

Se debe interrumpir la carga si la temperatura sobrepasa el límite indicado. Un exceso de temperatura es síntoma de final de carga, o de batería defectuosa.

Evitar que las emanaciones de ácido lleguen al cargador, ya que pueden deteriorarlo.

La batería se considera completamente cargada cuando con la intensidad de corriente prescrita, los valores de tensión entre bornes y la densidad del electrolito no varían de forma apreciable durante dos horas consecutivas.

Al terminar la carga se debe cortar la alimentación del cargador y posteriormente desconectar las pinzas de la batería, para evitar pico de tensión

y/o intensidad que pueda deteriorar el cargador, y lo que es más importante, chispas que produzcan explosiones.

5.1.7.2. SISTEMAS DE CARGA.

Los sistemas de carga los podemos clasificar en:

Sistema rápido; Intensidad decreciente; Sistemas-lentos; Intensidad a dos regímenes e Intensidad constante.

El sistema rápido precisa de un cargador adecuado, no siendo un sistema recomendable en general dado que necesita de una vigilancia mayor que en los otros sistemas.

Solo está recomendado este sistema si la batería está totalmente descargada y en perfecto estado de funcionamiento.

De los tres sistemas de carga lentos, es el de a intensidad contante el más adecuado para cualquier tipo de batería, sobre todo si se desconoce el estado de la misma.

La intensidad máxima de carga debe de ser del 10% de la capacidad nominal, ejemplo: para una batería de capacidad normal $C = 40 \text{ Ah}$, tendremos que seleccionar una intensidad de como máximo 4 A.

5.1.8. MANTENIMIENTO DE BATERÍAS EN SERVICIO.

Para un buen mantenimiento en servicio de las baterías tenemos que observar las siguientes recomendaciones:

Mantener la tapa completamente limpia, cuidando de no introducir en los vasos residuos o suciedad. Limpiar con un trapo empapado en agua con bicarbonato, posteriormente lavar con un trapo húmedo.

Comprobar el estado de los cables y terminales. Si están en mal estado deben sustituirse.

Los terminales deben mantenerse fuertemente sujetos a los bornes de la batería y cubiertos con una ligera capa de vaselina.

El alojamiento de la batería en la vivienda y las piezas de sujeción, no deben mostrar síntomas de corrosión.

La batería debe ir sujeta en su alojamiento, para no estar en peligro de vibraciones que puedan provocar el desprendimiento de materia activa y deformaciones en las placas, cortocircuitos internos y agrietamientos del bloque.

Revisar el nivel del electrolito una vez al mes en caso necesario añadir agua destilada o desmineralizada hasta el nivel. No añadir agua corriente ya que tiene impurezas que facilitan la autodescarga y deterioro de la batería.

No medir la densidad del electrolito inmediatamente después de añadir agua, dado que la medida será errónea al no encontrarse el electrolito completamente homogeneizado.

No dejar llaves ni objetos metálicos encima de la batería que puedan hacer contacto con los bornes. Evitar hacer cortocircuitos, existe peligro de explosión y pueden ocasionar daños en los sistemas electrónicos.

5.1.9. INDICADORES DE ANOMALÍAS EN BATERÍAS.

En las baterías existen factores fácilmente apreciables, que son síntomas inconfundibles de anomalías, como son:

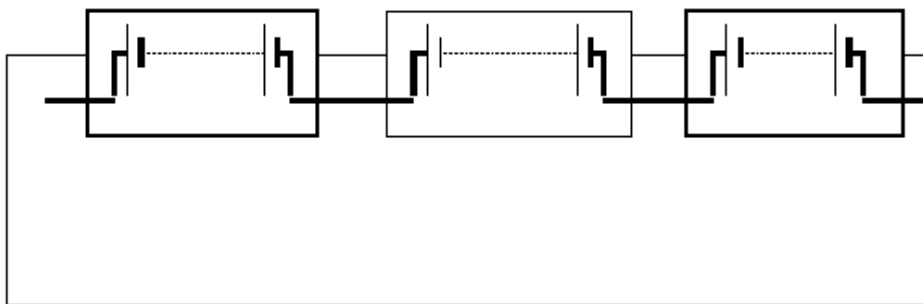
Consumo excesivo de agua.

Si el consumo es excesivo en todos los vasos es síntoma de sobrecargas por mal funcionamiento del regulador.

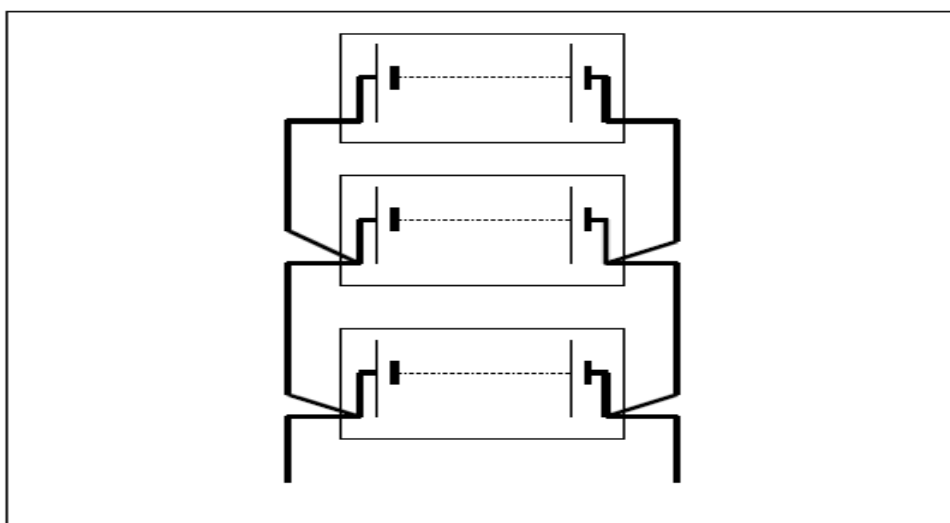
Si el consumo excesivo de agua se limita a un solo vaso, probablemente el elemento afectado esté en mal estado o bien el monobloque tenga alguna fisura.

5.1.10. Asociación Baterías.

Las baterías se pueden asociar en serie o en paralelo según nuestras necesidades. Para asociar las baterías en paralelo se ha de hacer uniando los polos del mismo signo de las baterías que se desee, El voltaje final es el de una de las baterías que se han conectado (12 Voltios) pero con más energía e intensidad que solo con una de ellas. Será esta la manera en la que se conectaran las baterías en el presente proyecto.



Acoplamiento de baterías en serie.



Acoplamiento de batería en paralelo.

Para asociar en serie se conecta el polo negativo de una con el positivo de la siguiente de manera que al final se tiene en disposición el polo positivo de la primera y el negativo de la última para el conexionado que se desee. Esta conexión nos dará un voltaje final igual a la suma de las baterías conectadas pero para este conexionado las baterías deben de ser de capacidad parecida para que una de ellas no se agote antes que las demás, este forma de conexión se realiza principalmente para voltajes de 24 Voltios.

5.1.11. BATERÍAS UTILIZADAS.

Para comprobar el buen estado de la batería que se iban a utilizar, antes de su uso en el aerogenerador, se le sometió a dos ensayos, uno de descarga y otro de carga.

En el ensayo de descarga de la batería se conectó en bornes de la misma una resistencia de valor 3.6 ohmios. Los valores de tensión, corriente y potencia

se tomaban con un adquisidor de datos llamado yokogawa, el cual tomaba datos del estado de la batería cada 10 segundos

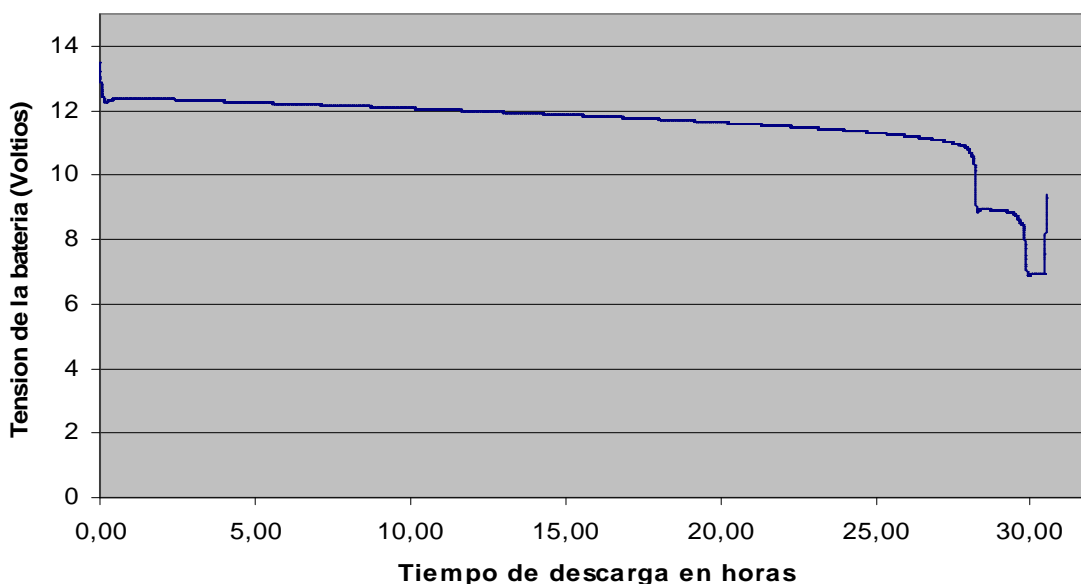
Para no reducir la vida útil de la batería la descarga no debía de bajar de 10.8 V pero por un fallo a la hora de prever cuando iba a suceder eso, se le sometió a la batería a una descarga perjudicial llegando a los 6.8 V, llegando a la zona de ruptura.

Se puede apreciar en la grafica como una vez que llega la tensión de la batería a unos 10.8 V empieza a caer en picado hasta que llega a un valor de tensión de 9 V en el que está unas dos horas suministrando alrededor de tres amperios.

Después de estas dos horas a una tensión constante el valor del potencial en bornes de la batería desciende de nuevo en picado hasta los 6.7 V que fue donde se desconectó la resistencia.

Una cosa que también merece comentario es que en el momento en el que se desconecta la resistencia de la batería la tensión de esta empieza a subir rápidamente hasta estabilizarse en unos 12 V

Curva de descarga de la bateria con resistencia de 3,6 ohmios



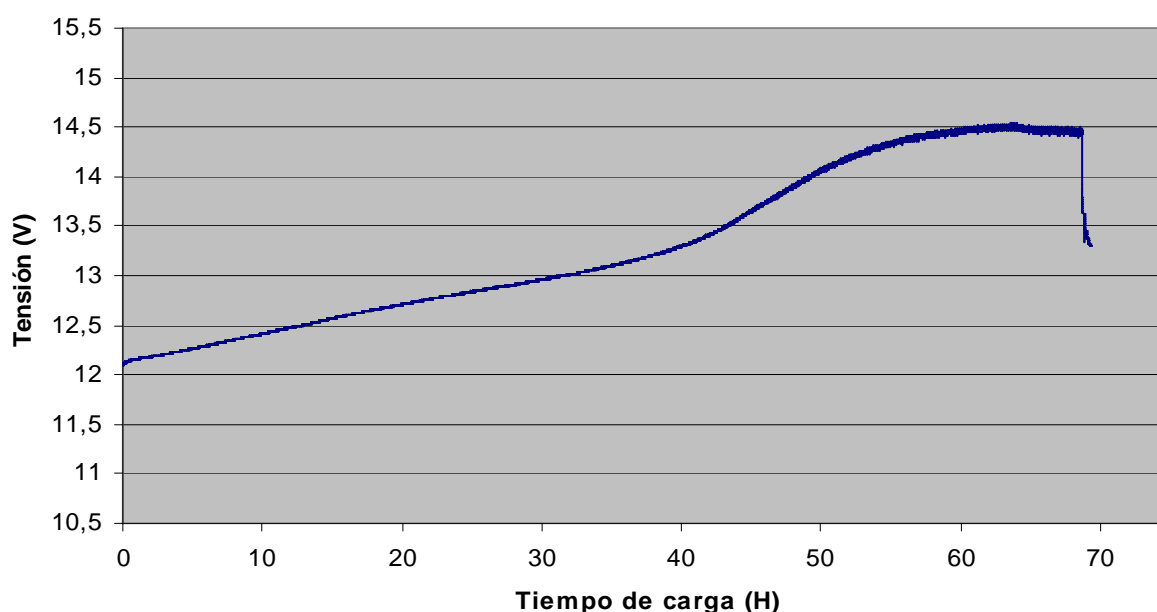
Para este otro ensayo de la batería, el de carga de la misma se procedió de manera análoga al ensayo de descarga.

En este caso se conectaron los bornes de la batería a una fuente de corriente y con la ayuda del yokogawa se obtuvieron cada 10 segundos los datos de tensión corriente y potencia de la batería.

En la gráfica que a continuación se muestra se puede observar que durante las primeras 40 horas de carga a una corriente más o menos constante de 3.5 A, la tensión en bornes de la batería aumenta de una manera más o menos lineal. Después de esta ascensión de la tensión hasta un valor de 13.5 V la gráfica hace como una curva en la que sube aún más rápido hasta llegar a un valor de tensión de 14.5 en el cual se mantendrá hasta que se desconecte la fuente de corriente.

También se observa como en el momento que se desconecta la fuente de corriente la tensión de la batería desciende en picado hasta colocarse alrededor de unos 12.8 V

GRAFICA DE CARGA



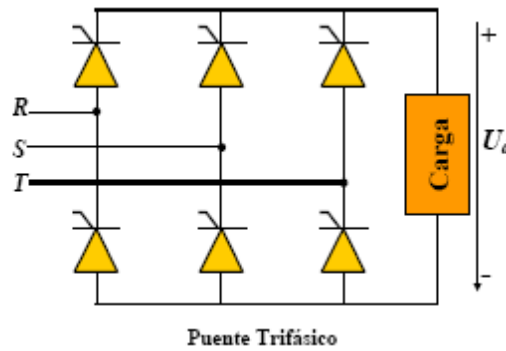
5.2. RECTIFICADOR TRIFASICO.

En este proyecto, como ya se ha comentado, se incorpora un rectificador trifásico que rectifique la tensión antes de su almacenamiento en las baterías. En este apartado, se describen los rectificadores y se elige uno para su incorporación a la instalación una vez que ya se han observado los resultados de incluir este elemento en el apartado de conversión eléctrica.

Existen rectificadores controlados y no controlados.

En los rectificadores controlados es posible regular la tensión de salida, llevan tiristores para controlar el ángulo de fase, por lo tanto se controla la tensión media de salida. Los tiristores se comportan como diodos, es decir, bloquea las tensiones inversas y puede conducir las tensiones directas, pero solamente a partir del instante en el que se aplica corriente positiva entre la puerta y el cátodo. Esta diferencia es la que permite disponer de una

rectificación controlada. Durante el intervalo de conducción, la tensión en la carga coincide con la tensión de red.

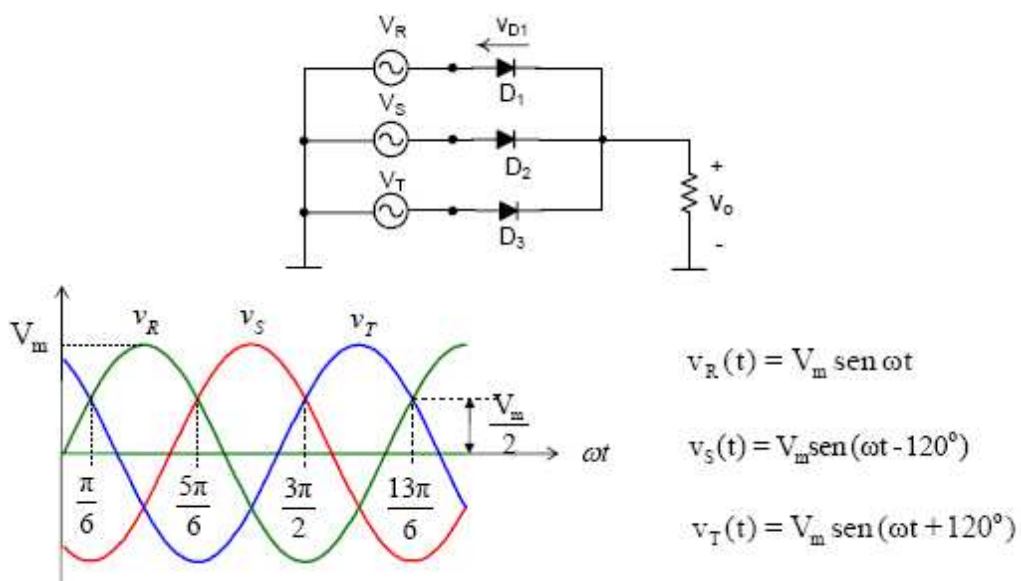


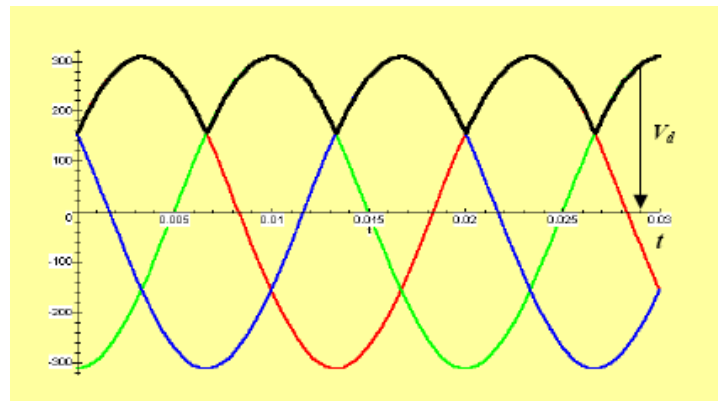
En este caso se necesita el máximo voltaje por lo que el ángulo de disparo necesario para satisfacer esta necesidad sería el de 0 grados que es lo que se consigue cuando se utiliza un diodo por lo que se considera mejor la opción de utilizar un puente rectificador de diodos en lugar de con tiristores y de esta manera reducir el precio y la complejidad del sistema.

Los no controlados son los rectificadores con diodos que pueden ser monofásicos o trifásicos. En este caso la tensión de salida depende de la carga.

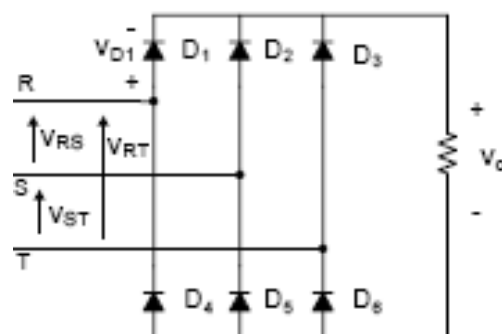
En este caso al no ser necesario controlar el ángulo de fase, se verá únicamente la conveniencia de los rectificadores no controlados, y dentro de estos, solamente los rectificadores trifásicos ya que los monofásicos no sirven debido a la naturaleza trifásica del generador de la instalación.

Una posibilidad es la de colocar un rectificador no controlado trifásico de media onda.

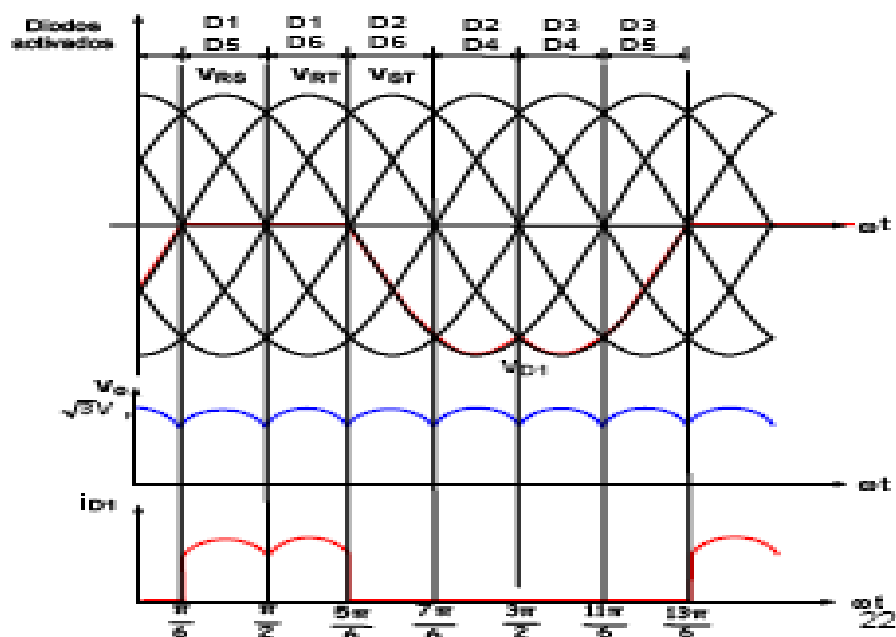




La otra opción es la de colocar un rectificador trifásico no controlado de onda completa:



En esta situación tenemos 6 diodos, pero mayor tensión de salida y menor rizado de la tensión de salida lo que le da una gran ventaja respecto al rectificador de media onda.



En este circuito los diodos conducen dos a dos como se observa en el dibujo, y cada uno de ellos funciona durante 120° . Los diodos que conducen en cada momento son los que tienen aplicada la tensión instantánea compuesta o de línea (fase a fase) más elevada.

En una situación inicial en la que están conduciendo los diodos D3 y D5, al llegar al instante $\pi/6$, la tensión compuesta mayor del puente es V_{rs} , por lo que D1 comienza a conducir por tener polarización positiva, el diodo D5 sigue conduciendo y D3 deja de conducir por quedar polarizado inversamente. Por lo que a partir de este momento conducen D1 y D5 y la corriente sigue el camino señalado en la parte inferior del dibujo, por lo que la tensión en bornes de la carga es la de bornes de los diodos D5 y D1, es decir V_{rs} .

Esta situación continua durante 60° , hasta el punto $\pi/2$ en el que se hace mayor la tensión V_{rt} , por lo que el diodo D5 queda sometido a polarización inversa y pasa a conducir el diodo D6 y ahora en esta nueva situación quedan conduciendo los diodos D6 y D1 que lo hacen hasta el instante $5\pi/6$ en el que conducirán D2 y D6, y así sucesivamente.

Así pues, la tensión V_r en la carga está formada por tramos de 60° de las respectivas tensiones de línea que son más elevadas en cada momento. De este modo, en un ciclo completo de 360° existen 6 tramos de onda. Los puntos de cambio se denominan puntos de conmutación.

En este proyecto se ha decidido colocar un rectificador no controlado de onda completa para intentar aprovechar en la medida de lo posible toda la tensión que pueda entregar el aerogenerador.

Su colocación se ha decidido que sea nada más salir los cables del aerogenerador para evitar tener que transportar los 3 cables por la torre y así solo tener que realizar esta tarea con los dos cables de la tensión rectificada, por lo que después del puente rectificador, momento en el cual ya tenemos solo dos cables, se bajan por la torre y llegan al cuadro de control con el consiguiente ahorro de material y problemas derivados de tener 3 cables con corriente alterna en lugar de 2 en corriente continua.

Para este proyecto se ha decidido comprar un rectificador ya construido. La condición debía de ser que soportará más de 15 amperios que iba a ser el mínimo que se ha marcado para toda la instalación. Entre la variedad de posibilidades se ha elegido por el siguiente:



07122130 PUENTE. TRIFASICO

Descripción

- Puente rectificador, 30A, 1200V, 3PH.
- Número de Fases: Tres.
- Tensión Vrrm: 1200V.
- Av. actual Si: 30A.
- Máximo Voltaje Vf: 2.2V.
- Tipo de montaje: Panel de.
- Temperatura de operación: -40 ° C a +150 ° C.
- Puente rectificador Tipo de caja: G 13.
- Número de Pins: 5.
- Tipo de caja: G 13.
- Tipo de diodo: puente rectificador, tres fases.
- External Depth: 45 mm.
- Exterior Longitud / Altura: 24 mm.
- Exteriores Ancho: 55mm.
- Max Consejo Altura: 55 mm.
- Corriente máxima FI: 370A.
- Temperatura máxima de funcionamiento: 150 ° C.
- Máxima Corriente de Salida: 30A.
- Temperatura mínima de funcionamiento: -40 ° C.
- Número de Fases: 3.
- Tipo de terminación: de tornillo.

5.3. BAJADA DE CORRIENTE.

En aerogeneradores de gran tamaño al la hora de bajar la corriente producida a la zona de la base de la torre se realiza simplemente sacando los tres cables del generador y bajándolos por el interior del tubo o torre.

El gran problema de esto es que en un determinado tiempo los cables se irán enrollando ya que el sistema de orientación que pone cara al viento a las palas hace que la nacelle, que es la estructura en la que se aloja toda la

maquinaria del aerogenerador, gire con la consecuencia inmediata del enrollamiento de los cables entre sí.

Este método de bajada de corriente puede llegar a ser peligroso ya que puede producir una gran avería: la rotura de los cables. Lo que se hace para que no se dañen es el proceso llamado reorientación. Este sistema se encarga de contar el número de vueltas que ha dado la nacelle sobre sí misma y cuando llega a esas vueltas se produce la reorientación en el que se recupera la situación inicial en la que los cables están sin enrollarse ni una sola vez. Evidentemente el inconveniente más importante es que el aerogenerador tiene que parar unas horas para recuperar su situación inicial perdiendo así tiempo de generación de electricidad.

Otra posibilidad de realizar la bajada de corriente sería mediante el uso de las escobillas. Éstas se encargarían de bajar la corriente de igual manera en como se alimenta la bobina de un rotor para su excitación.

Ésta técnica presenta alguna ventaja como la de evitar la reorientación ya que los cables no estarían unidos físicamente con la nacelle. Un gran inconveniente como todas las piezas en las que hay rozamiento es el desgaste producido por las escobillas.

Ésta técnica puede ser viable en:

- el caso de tener aerogeneradores de poca potencia,
- Cuando únicamente bajamos dos cables de la nacelle

Se dice bajar dos cables ya que así habría menos pérdidas tanto en los cables (al ahorrarnos uno), como en las escobillas ya que habría también únicamente un cable. El inconveniente de esto es que en los aerogeneradores de gran potencia no se puede rectificar la potencia generada ya que habría pérdidas en el inversor ac-dc.

En relación a este proyecto la bajada de corriente del alternador se realizó mediante las escobillas ya que éste método tiene más ventajas que inconvenientes en este caso.

Las ventajas con las que nos encontramos son por ejemplo su "sencillez" frente a la reorientación. Se dice sencillez porque el sistema de reorientación tiene un complejo sistema de sensores y motores encargados de contar el número de vueltas en un mismo sentido, de saber en qué momento deben parar la producción de electricidad para la reorientación etc.

En nuestro caso se ha realizado una rectificación inmediata de la corriente generada por el generador de imanes permanentes para lograr así

tener que bajar únicamente 2 cables, el de polaridad positiva y el de polaridad negativa.

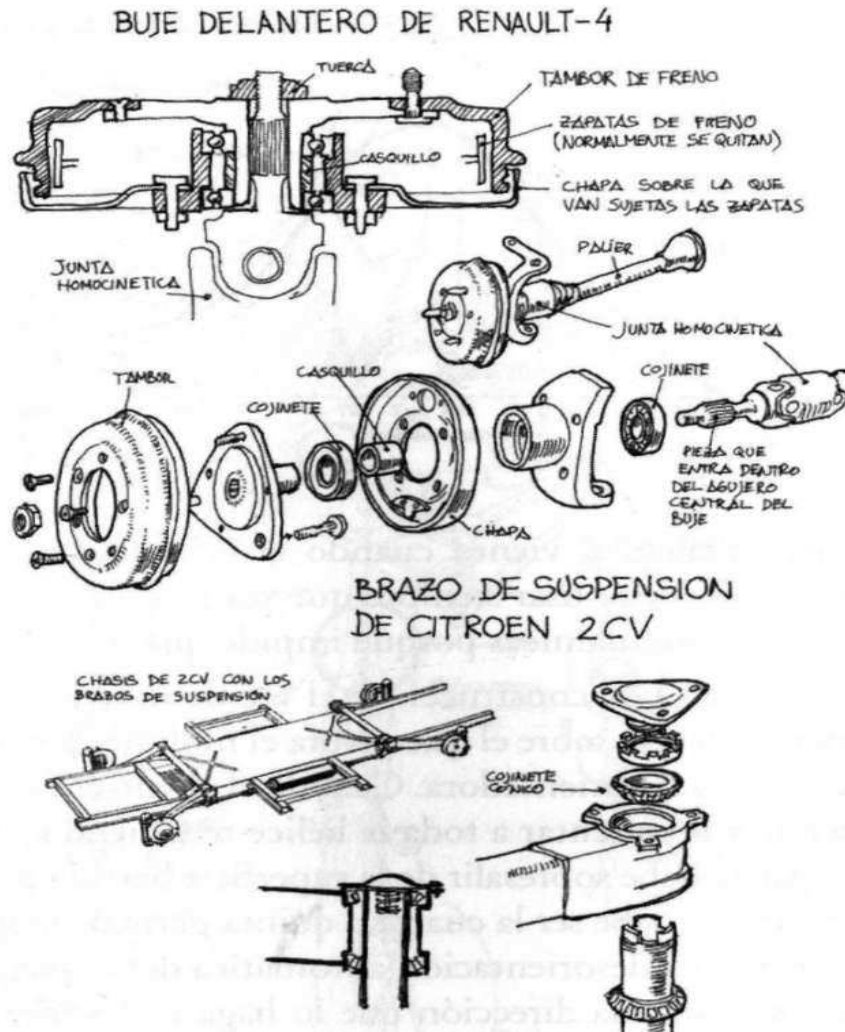
Una de las ventajas que presenta el uso de dos cables es que se

- reducen las pérdidas, ya que se dispondrá de un cable menos.
- El rozamiento en las escobillas se reduce (un cable menos)
- No hay que hacer ningún tipo de conversión para almacenar la energía en las baterías.

5.3.1. PROCESO, TIPOS Y PARTES DE LA BAJADA DE CORRIENTE.

5.3.1.1. Bajada de escobilla.

Esta bajada se emplea generalmente cuando el eje sobre el que pivota el molino es el buje delantero de Renault 4. Del molino se bajan dos cables: el borne positivo y el negativo. Es decir, en el propio aerogenerador irá el rectificador adecuado, que se explica adecuadamente en el apartado de la electrónica.



En este dibujo esquemático se puede observar el buje delantero de un Renault usado para el pivotamiento del aerogenerador entero. Se cree que es suficientemente robusto como para aguantar el peso de todo el conjunto de:

- Alternador
- Palas.
- Chapa de unión de las palas y el eje del rotor.
- El conjunto completo del sistema de orientación (veleta).
- El sistema de frenado.
- La fuerza del propio viento sobre las palas ya que éstas a su vez ejercen la fuerza sobre el buje.

A continuación se muestra la colocación en este proyecto de la escobilla que se encargará de bajar la corriente generada por el alternador y rectificada por el puente de diodos. En la foto se observa como el cable amarillo ya se encuentra justamente debajo de buje de coche, el cual va ya a las baterías. La escobilla está continuamente en contacto con la parte inferior del buje del coche, el cual es el encargado de estar en potencial no nulo y lograr así descender la corriente.

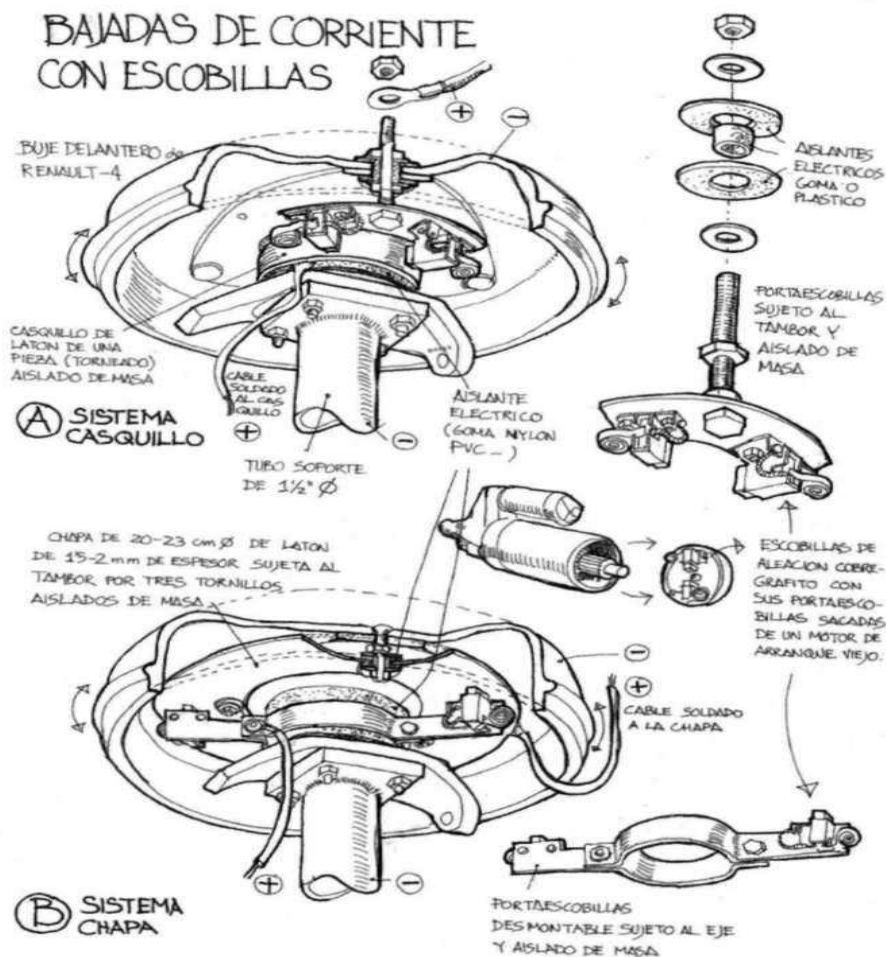
Lógicamente lo ideal sería bajar la corriente directamente con un cable para eliminar así el rozamiento de la escobilla. Como hacer eso va a ser imposible ya que se enrollaría el cable y por consiguiente se rompería, por ello se realizó el sistema de escobilla que tiene como principal inconveniente el desgaste que sufre el grafito de la escobilla, pero éste desgaste no será importante ya que la velocidad de rozamiento entre el buje y la propia escobilla será casi insignificante disminuyendo su desgaste.

La velocidad será pequeña porque la velocidad de orientación del aerogenerador será minúscula ya que el viento no suele cambiar de dirección bruscamente.



En un principio un buje de este tipo está diseñado para soportar fuerzas mucho mayores ya que un coche tiene mayor masa y ejerce fuerzas superiores al de nuestro aerogenerador. En este dibujo también se observa todas las piezas interiores del propio buje a tener en cuenta.

El borne negativo, lo bajamos por masa, tal y como se puede ver en la foto, eliminando así un cable, de modo que la corriente pase a través de los cojinetes para asegurar el paso de la corriente. El borne positivo puede bajarse para llevarlo a las baterías por dos sistemas, que utilizan escobillas de motor de arranque, con sus portaescobillas originales:



En éste otro dibujo también se observa el propio buje descrito con anterioridad ya instalado en la base del aerogenerador. También está dibujado de una manera bastante clara las dos alternativas explicadas para la bajada de corriente explicadas párrafos atrás.

En el dibujo de arriba, del tipo A, se aprecia entre otras cosas:

- El tubo que soporta todo el conjunto.
- El borne positivo de la salida del rectificador que se conecta a la parte superior del buje.
- El aislante de nylon que sirve para separar, eléctricamente hablando entre la polaridad negativa y positiva.
- El casquillo de latón de una pieza, que es la pieza que hay que torneear, esta pieza es la encargada de bajar la corriente ya que sobre ella están rozando las escobillas.
- Se observa también que para seguir bajando el borne positivo, se suelda con estaño, por ejemplo, al casquillo, que es el que tiene polaridad positiva.

Es de gran importancia saber que la forma del buje en forma de paraguas no es de casualidad, sino que sirve para mantener seco, en la medida de lo posible los bornes de conexión y los rodamientos del propio buje.

En el otro dibujo, el del tipo B, sería otra opción de hacer bajar la corriente hacia las baterías. Éste es prácticamente igual al anterior salvo por la diferencia de que el elemento encargado de transmitir la corriente es una chapa con forma de arandela por la que se hace circular una corriente por medio de las escobillas.

Una vez que hayamos construido eso tenemos que atornillar, en este caso el cable de bajada de corriente al porta escobillas. Es relevante comentar que el porta escobillas se consiguió del motor de arranque de un coche que estaba en un desguace.

5.3.1.2 Sistema casquillo.

Se realiza con un casquillo de latón, a poder ser torneado sobre un aislante de plástico de Nylon. El inconveniente que presenta ésta técnica es que se tiene que disponer de un torno lo cual no es muy común.

5.3.1.3 Sistema de chapa.

Para poder evitar el uso del torno se puede utilizar otra técnica que sería usar una chapa de latón gruesa (de unos 2 mm de espesor), cortada en forma

de arandela y sujeta con tres tornillos aislados en masa, ya que si no se aísla el cable de polaridad positivo de la masa se puede formar un cortocircuito y causar grandes daños, sobretodo en la electrónica

Las porta escobillas se soportan en una abrazadera aislada de la masa.

De este modo, el agujero central nos queda libre para la bajada de la sirga del sistema de frenado manual, que está explicado correctamente en la parte de frenado del aerogenerador El tambor del buje hace de «paraguas» y deja secos los contactos. Esta bajada no da problemas, y es muy buena para los molinos de hasta 3 - 4 m de diámetro.

5.4. NECESIDADES DE LA INSTALACIÓN.

El aerogenerador debe suministrar energía para satisfacer las necesidades de una pequeña vivienda. Estas necesidades deben de ser limitadas debido a que la energía esta almacenada en unas baterías de 12 voltios. Así pues, esta energía ha de ser utilizada con moderación y responsabilidad por lo que no se empleará para transformarla en calor, ya sea cocinar o calentar ya que la energía transformada en calor está mal aprovechada y en el caso de cocinar se puede emplear una cocina de gas.

Hay otros aparatos que también utilizan la energía para transformarla en calor como planchas y soldadores pero debido a que su utilización es muy esporádica no suponen un consumo reseñable y en caso de necesitarla se podrían utilizar si no se va a abusar de ella.

Para la edificación para la que se pensó este proyecto las necesidades serán sumamente básicas y se limitarán a la utilización habitual de varios puntos de luz una televisión y una pequeña nevera.

Se ha pensado en separar la instalación destinada a la iluminación de la destinada a la televisión y la nevera. En el caso de la instalación de la iluminación se partirá directamente de las baterías en corriente continua y en el caso de la televisión y la nevera se partirá del inversor explicado en el punto correspondiente.

5.4.1. ILUMINACIÓN.

Como se ha dicho, la instalación de la iluminación se hará en corriente continua a 12 voltios. Para iluminar una estancia es más importante el rendimiento de la lámpara en conjunto que la potencia de las bombillas. Las lámparas deben permitir que la luz salga sin obstáculos y dirigida a donde se

precise, por lo que evitaremos el uso de apantallamientos y se ha optado por la utilización de fluorescentes de bajo consumo para economizar la electricidad. Los tubos fluorescentes dan el doble de luz que las bombillas para el mismo consumo, esta luz es más difusa que la de la bombilla y puede ser mejor para ciertas actividades como la lectura.

5.4.2. APARATOS.

Por otro lado ira la instalación destinada a los aparatos instalados en la vivienda. Esta parte de la instalación parte de las baterías y mediante un inversor, explicado en el apartado correspondiente, se lleva la electricidad a la ubicación de los distintos aparatos.

5.4.3. NEVERA.

La nevera es un electrodoméstico que puede necesitar de mucha energía. Es el elemento que más consumo va a tener puesto que en los momentos de estancia en la vivienda estará conectado continuamente a diferencia del resto de equipos. Debido al carácter estacional de la vivienda de este proyecto la nevera servirá principalmente para la conservación de algún alimento durante el periodo de estancia por lo que no será necesario que la nevera tenga una temperatura inferior a los 6°C. Además no se necesitan grandes compartimentos de almacenaje por lo que una pequeña nevera satisfará las pequeñas necesidades de este electrodoméstico.

En este caso se dispone con anterioridad de una pequeña nevera Zanussi.





Modelo F75
Capacidad 75 litros
Voltaje 220V 50Hz
Potencia 82 W

En caso de no tener una con anterioridad existen en el mercado multitud de gamas y capacidades de diferentes suministradores con capacidades parecidas que rondan los 200 euros.

5.4.4. TELEVISOR.

El televisor es el otro elemento de la instalación que necesita 220 voltios. En este caso también se dispone de un aparato con anterioridad.

Una televisión Philips de 21'
Voltaje 220V 50Hz
Potencia 55 w

En caso de no disponer de una televisión con anterioridad habría que tener en cuenta en el presupuesto el precio actual de mercado que para una televisión de características similares en cuanto a pulgadas nos podemos encontrar con televisores de pantalla plana con potencias de 80 vatios y unos 350 euros aproximadamente.

5.4.5. INSTALACIÓN.

La edificación en la que se basa este proyecto dispone de dos plantas, una planta baja y otra superior de menor superficie que la planta baja y un pasillo de entrada.

En el pasillo de entrada se colocará un fluorescente junto a la puerta de acceso a la edificación.

En la planta baja iran colocados la nevera, el televisor y dos luminarias en el techo centradas respecto a la estancia así como otra pequeña bombilla de bajo consumo para el baño.

En la planta superior que es donde estarán colocadas las baterías, se colocará un fluorescente y una pequeña bombilla para la mesilla.

Las dos pequeñas bombillas para el baño y la mesilla serán:



Lámpara compacta 12Vcc/15W.
11,25€

En un principio se instalarán de 4 a 5 puntos de luz con este tipo de fluorescentes y se ha optado por una regleta con fluorescente para 12V de 8w.



Precio base: €13.12

Excepto una que ira en la planta baja y que será de mayor potencia.
Regleta para fluorescente 36W/12V
18,35€



Hay que tener en cuenta que se puede perder una importante cantidad de energía por los cables de la instalación si son demasiados delgados o aumentar el presupuesto en caso de ser demasiado gruesos, por lo que conviene buscar una solución adecuada.

En el caso de la instalación procedente del inversor, un pequeño cálculo ayudará a estimar una sección óptima para los cables destinados a la nevera y el televisor.

Los cables son de cobre por lo que su resistividad es $56 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$

El voltaje será de 220 voltios.

La caída de tensión la estimamos en un 2%.

La longitud es de, en el mayor de los casos 10 metros.

La potencia será de 82 vatios + 55 vatios = 132 vatios en el caso de la nevera y el televisor.

$$S = \frac{2 \cdot l \cdot P}{\Delta V \cdot \gamma \cdot v} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 132}{4,6 \cdot 56 \cdot 220} = 0,046 \text{ mm}^2$$

Mientras que la potencia es de 36 vatios +8 vatios (5 puntos de luz) + 15 vatios = 91 vatios en el caso de los fluorescentes con un 5% de caída de tensión, es decir, 0,6 V.

$$S = \frac{2 \cdot l \cdot P}{\Delta V \cdot \gamma \cdot v} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 91}{0.6 \cdot 56 \cdot 12} = 4.5 \text{ mm}^2$$

Para la parte de la instalación de 12 voltios con cables de sección de 3 mm² será suficiente.

5.5. AUTONOMÍA DE LA INSTALACIÓN.

Para hacernos una idea de cuanto tiempo se puede estar consumiendo energía de las baterías, en el caso de que no tengamos ninguna fuente de entrada de energía, (como son las placas solares o el aerogenerador), se han realizado los siguientes cálculos:

Suponiendo que se dispone de 6 baterías de 110 Ah cada una, (es irrelevante que estén en serie o en paralelo), estén al 100 % de su capacidad y que contemos con el inversor de la primera opción de la tabla del anterior punto:

Según los cálculos hechos la tensión a la cual se van a poner las baterías va a ser de 24V, por lo tanto la asociación que se realizará será la siguiente:

Se pondrán dos grupos de baterías, cada grupo será de 3 baterías conectadas en paralelo formando una ' batería ' de 12 V y 330 Ah, después esas ' baterías ' se colocaran en serie para formar una única ' batería ' de 24 V y 330 Ah.

Máxima corriente entregada por el inversor en el lado de alterna:

$$P = V \cdot I$$

$$2000 = 220 \cdot I$$

$$I = 9A$$

Sabiendo que habrá una conservación de energías tanto en la entrada como en la salida del inversor:

$$E_{\text{entrada}} = E_{\text{salida}}$$

$$V \cdot I \cdot t = V \cdot I_{\text{max}} \cdot t$$

$$24 \cdot 330 \cdot 1 = 220 \cdot 9 \cdot t$$

$$t = 4h$$

5.6. REGULADORES.

5.6.1. REGULADORES ELECTRONICOS DE LA CARGA.

Tal y como se explica en el apartado de baterías, las sobrecargas o el exceso de descarga de las mismas puede causar daños a largo plazo.

La causa de la sobrecarga se debe, tal y como su nombre indica al exceso de carga que sufre una batería, éste fenómeno en nuestro caso se debe a que una vez que la batería esta cargada completamente el aerogenerador, que sigue estando conectado a ella le sigue enviando corriente, la cual no tiene otra salida que la batería.

La causa del otro problema en las baterías, es decir el exceso de descarga de las mismas se debe fundamentalmente a que la energía que tiene acumulada dentro de ella se descarga completamente debido a la demanda de electricidad que hacemos de ella. Evidentemente esto es fruto de que la entrada de electricidad a la batería es nulo es decir, en este caso, el aerogenerador no está en funcionamiento por diferentes motivos (no hay viento, está averiado etc.)

Los sistemas que se incorporan a éste proyecto para que no sucedan éste tipo de cosas entre otras son los siguientes:

- Regulación electrónico de voltaje,
- Desconector de fin de descarga
- Circuito de fin de carga

5.6.2. REGULADOR ELECTRONICO DE VOLTAJE.

Un regulador, permite que pase la corriente del generador, a las baterías, pero no a la inversa, ya que se descargarían y causarían todos los problemas que se comentan en el apartado de baterías.

Además, el regulador permite que el generador cargue cuando lo necesitan las baterías, y no carga cuando las baterías ya están cargadas, aunque gire el generador; así se impide que se sobrecarguen, ya que una sobrecarga, es perjudicial.

El regulador limita la intensidad máxima producida por el generador para que no se estropee el inducido por sobrecalentamiento. El regulador se coloca entre el generador y las baterías.

Conviene colocar el regulador en el propio aerogenerador, porque así sólo hay que bajar dos cables: el positivo y negativo a las baterías, pasando por el cuadro de control.

Si el regulador estuviera abajo, tendríamos que bajar tres cables del aerogenerador. Este sistema sería más complicado y con más probabilidades de fallos de contacto.

Hay dos tipos de reguladores:

- Mecánicos
- Electrónicos.

Los reguladores mecánicos (de bobinas) no deben usarse en aerogeneradores, ya que presentan muchos inconvenientes entre que las destacan son:

- Sólo se pueden ajustar un pequeño margen, y éste cambia con el tiempo, se estropean pronto, ya que se deterioran los contactos.
- Consumen mucha energía de la que produce el generador.
- Producen interferencias en la radio, televisión, teléfono...que para evitarlas habría que apantallar los cables, lo que complicaría y encarecería la instalación.

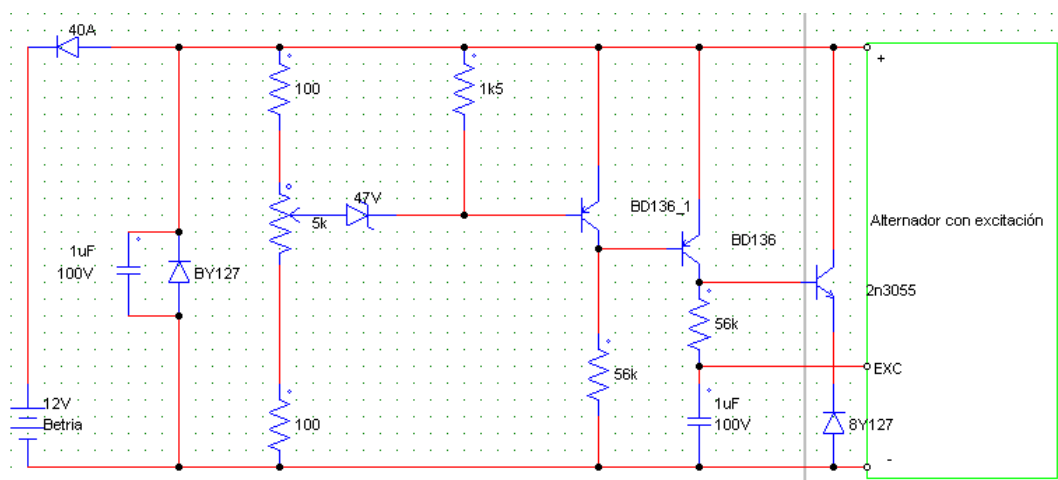
En cuanto a los reguladores electrónicos, pueden ser comerciales o autoconstruidos. Éstos reguladores pueden ser de dos tipos:

- Comerciales.
- Autoconstruidos.

Los reguladores electrónicos comerciales van aceptablemente cuando hay poca distancia del aerogenerador, que es nuestro caso a las baterías, y no tienen posibilidad de ajustes. Estos reguladores tienen los inconvenientes de que son caros y se estropean con bastante facilidad.

Otra alternativa, consiste en construirse tu propio regulador electrónico ajustable. El circuito está preparado para protegerse de las irregularidades de funcionamiento, es decir la variedad de tensiones (valor eficaz) que existe en la entrada a la batería pudiendo ajustar el voltaje del generador según tus necesidades. Sirve para dinamos y alternadores de 12 y 24 V, funcionando asociado con el regulador del régimen de revoluciones. Así la instalación puede dejarse al abandono, sin peligro de que se sobrecarguen las baterías.

En nuestro caso las baterías que se van a utilizar son de una tensión de 12 voltios. Éste dato nos da la posibilidad de calibrar el regulador de tensión a un potencial algo superior a la de las propias baterías, es decir se podría calibrar a una tensión en torno a 14 voltios. Aquí se muestra un ejemplo para el caso de disponer de un alternador con excitación.



5.6.3. DESCONECTADOR DE FIN DE DESCARGA.

Este circuito electrónico puede servir de gran ayuda para la protección de la instalación y sobre todo de las baterías. De este modo en el hipotético caso de que se quedara conectado algún aparato en la edificación por algún descuido, impide que las baterías se descarguen completamente por ser muy perjudicial para ellas como se explico en el apartado de las baterías.

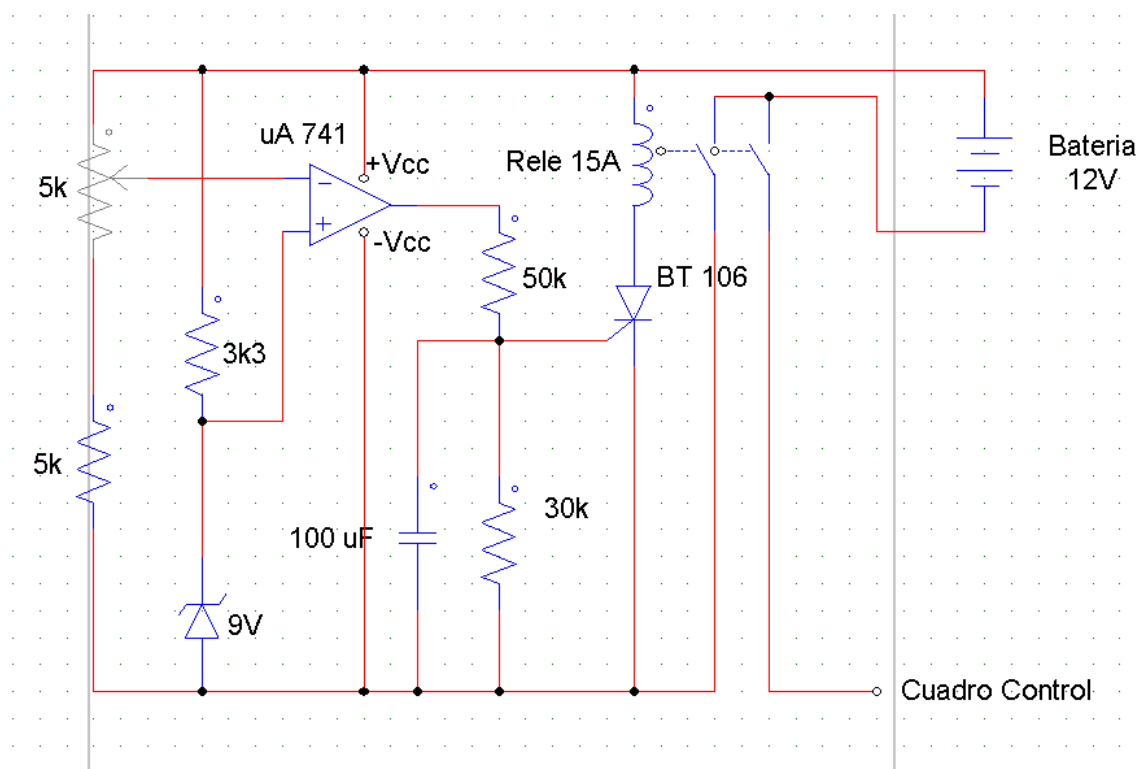
Se ha dicho en el párrafo anterior que puede protegernos la instalación porque dejar un aparato encendido tanto tiempo puede causar algún calentamiento e incluso algún incendio, así que ahí de la importancia del circuito. Éste regulador ira conectado entre las baterías (DC) y antes de la entrada al inversor (DC-AC), así pues únicamente soportará tensión continua.

El regulador de mínima tiene por misión desconectar automáticamente las baterías del resto de la instalación, cuando el voltaje es inferior a uno determinado, que se ajusta previamente.

En esta instalación que va a estar compuesta por baterías de 12 voltios se ajustará a 11,5 voltios.

Para construir este aparato, se requieren los componentes electrónicos indicados, un interruptor de 30 A, de dos posiciones dos circuitos normalmente cerrados, y una bobina de las que llevan acoplados los motores de arranque, con su núcleo.

La bobina y el interruptor se pueden sustituir por un interruptor automático (magnético), retocado. En situación ordinaria, el circuito consume sólo 3 mA. El funcionamiento básico es el siguiente: en el momento de la desconexión, el circuito da corriente a la bobina, ésta tira del interruptor, y desconecta las baterías.



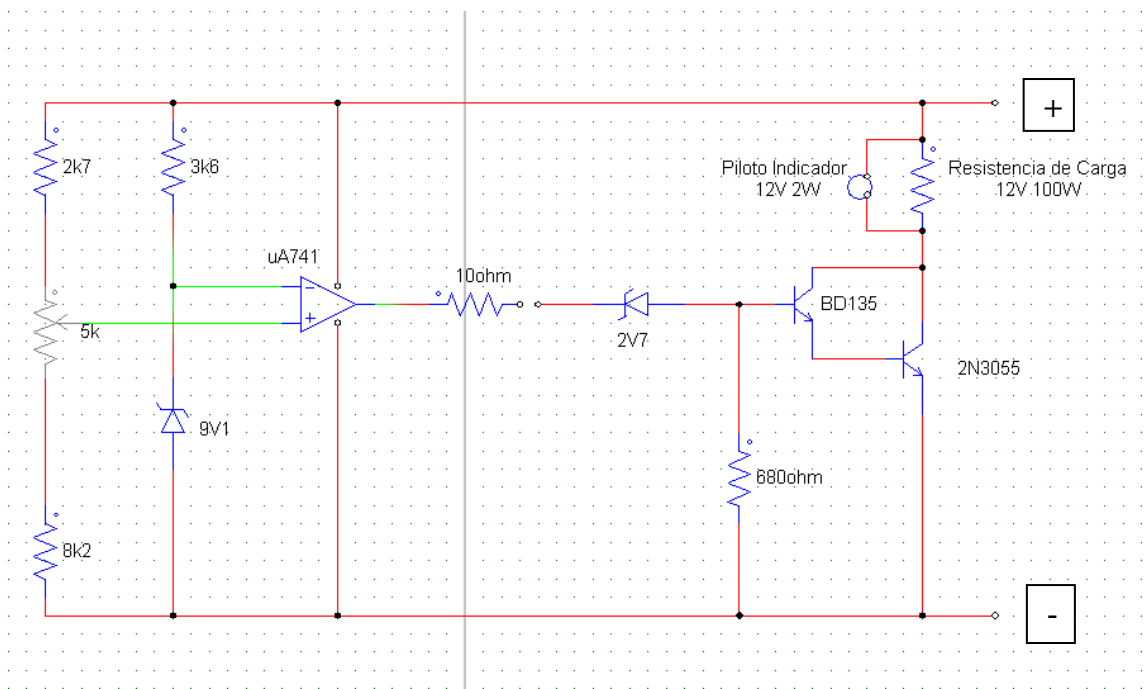
5.6.4. CIRCUITO DE FIN DE CARGA.

Éste circuito se encarga principalmente de proteger a las baterías cuando existe exceso de carga. Se podría pensar en dos opciones para llevar a cabo éste objetivo de protegerlas. En cualquier caso la tensión máxima a la que las baterías deben estar será 14 voltios.

El sistema más sencillo sería eliminar el exceso de carga producido por el aerogenerador. Éste exceso se podría eliminar por ejemplo mediante una resistencia que se pusiera en funcionamiento cuando hiciera falta. Ahí entra el circuito electrónico, éste será el encargado de saber cuando tiene que dejar pasar corriente a las baterías o a la resistencia para que esa energía se convierta en calor. Un inconveniente de éste sistema es el calor desprendido por la resistencia. Este calor si no es tratado adecuadamente puede llegar a ser peligroso por el tema de incendios, ya que si la resistencia está absorbiendo una gran cantidad de corriente el calor desprendido será bastante elevado.

La otra forma de proteger las baterías sería la fabricación de un circuito parecido al de desconector de fin de descarga que consiguiese separar eléctricamente, cuando haya exceso de tensión las baterías y el aerogenerador.

El gran inconveniente de hacer eso es que al separar el generador de su carga éste estará trabajando en vacío que se llama, con el efecto posterior al embalamiento del aerogenerador, es decir éste empezaría a aumentar su velocidad pudiendo llegar a ser peligroso como ya se ha hablado en apartados como el del freno del aerogenerador.

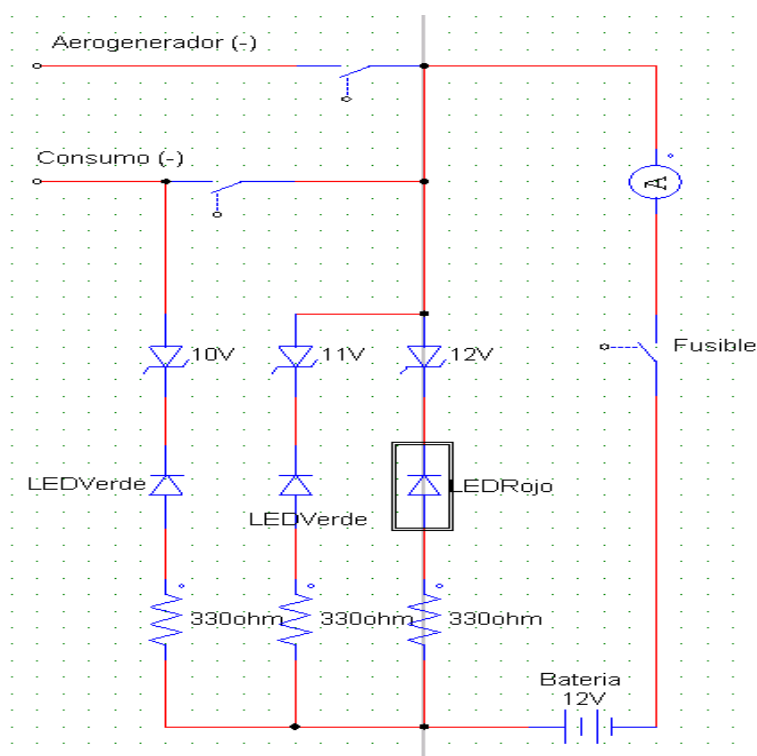


En este proyecto se ha optado por el circuito anterior que se corresponde con la primera opción de las expuestas anteriormente. Como se observa, en caso de que el voltaje en las baterías supere el indicado, la energía que envíe el aerogenerador será consumida en la resistencia de descarga.

5.7. CUADRO DE CONTROL.

Además de estos reguladores de control de carga para las baterías, se añade un cuadro de control previo.

Este cuadro de control puede hacerse de manera sencilla con el diseño que se observa en el siguiente dibujo.



Este circuito, consta de tres pilotos indicadores, uno de baja carga, otro de media y otro de sobrecarga. El primer LED (verde), entra en funcionamiento con el interruptor de consumo conectado. Los otros dos permanecen siempre conectados. De esta manera funcionarían aun sin carga.

En instalaciones de 12 Voltios, permanecerá encendido el primer indicador cuando la tensión sea superior a 11,5 V, el segundo cuando sea superior a 12,5 V, y el tercero (rojo), cuando sea superior a 14 V.

Con el primer indicador verde encendido, podemos consumir corriente. En caso de que no se encienda con el interruptor de consumo conectado, las baterías estarán degradadas y no se deberá consumir corriente para evitar que se sulfaten, otra causa puede ser que el fusible se haya fundido.

Los indicadores verdes encendidos indican que las baterías están ya a plena carga. Si el indicador rojo se enciende, significa que las baterías están cargadas y la carga del aerogenerador es excesiva por lo que habrá que desorientarlo para que no se cargue o dejar que el limitador funcione.

Indicamos las características de los componentes:

Voltios zener L E D		
11,5	10v.	Verde
12,5	11v.	Verde
14	12v.	Rojo

Además se coloca un fusible para cortar la corriente a las baterías cuando alcanza valores anormalmente grandes.

Si con los botones del aerogenerador y de consumo el piloto no se enciende, puede estar fundido el fusible o descargada las baterías.

De esta manera además se podrá saber en caso de avería si esta procede del aerogenerador o de la instalación de consumo, ya que si al conectar el botón del aerogenerador el amperímetro marca un alto valor es porque existirá una avería en el aerogenerador que habrá que reparar. En cambio, si el amperímetro no marca nada al estar conectado el aerogenerador pero al conectar el botón del consumo sí que marca valores anormales esto querrá decir que existe una avería en la instalación de consumo de la vivienda que habrá que reparar.

En este caso se disponía con anterioridad del siguiente cuadro de control:



Regulador de carga NK 10 A 12 V
[NK1012]

Características:

Regulador de carga destinado al control y regulación electrónica de instalaciones de energía procedente de paneles fotovoltaicos.

Tensión de alimentación: 12V
Consumo máximo: 0.005Ma
Circuito compensador autodescarga de batería: 150mA
Escala amperímetro: 10Amp
Escala Voltímetro: 25V
Voltaje de corte: 14.30V
Indicador de Batería baja: Led Rojo
Indicador de Batería cargada: Led Verde
Conexionado: Bornes 40 Amp
Dimensionado: 215x185x179
75.56EUR

Como se puede observar, los conectores superiores son la entrada al cuadro de control desde el aerogenerador. En los contactores inferiores podemos visualizar dos posibilidades, los de la derecha, que son los conectores de las baterías y los de la izquierda, que son los conectores destinados al consumo.

Además el cuadro de control dispone de dos interruptores:

El situado a la derecha, que se destina al encendido y apagado del cuadro de control y el situado a la izquierda que dispone de 3 posiciones; si se coloca a la izquierda se vera el voltaje de entrada al cuadro de control, en la posición central esta apagado y en la posición de la derecha se visualiza el voltaje de las baterías.

Para mayor seguridad se colocaron tres fusibles en las entradas y salidas del regulador de control como se muestra en la siguiente figura.



El fusible de más a la derecha es el correspondiente a la entrada al cuadro de control, es decir, los cables que llegan desde el aerogenerador pasan por este fusible para después ir a los conectores superiores del cuadro de control.

Como también se aprecia, el fusible de más a la izquierda es el destinado al consumo. De los conectores izquierdos del cuadro de control salen los dos cables destinados al consumo previo paso por el fusible izquierdo.

Así mismo, el fusible central es el destinado a las baterías después de su salida de los conectores derechos del cuadro de control.

El montaje final de este cuadro de control quedará así:



Además de este cuadro y como elemento funcional se ha colocado un amperímetro en la bajada del aerogenerador para visualizar la corriente de entrada del aerogenerador ya que el amperímetro del cuadro de control, recibe la corriente de las dos placas solares preexistentes, y mostrará el amperaje de entrada al cuadro y no el del aerogenerador individualmente. El amperímetro instalado queda así:



5.8. CONVERTIDORES CC/CA.

5.8.1. INTRODUCCIÓN.

El propósito de un ondulator o inversor es convertir la energía eléctrica de una fuente de tensión o corriente continua (en nuestro proyecto sería las baterías donde se acumula la energía generada por el aerogenerador) en una de salida de corriente alterna de frecuencia variable, con tensión o corriente ajustable. La tensión obtenida tiene la forma de una onda periódica que está formada por tramos rectangulares o escalonados procedentes de la tensión de continua de alimentación, lo cual es suficiente para aplicaciones de mediana y pequeña potencia, como es en nuestro proyecto.

Para potencias elevadas es preciso mejorar la onda para que se acerque más a la onda sinusoidal, lo que se consigue en la práctica utilizando prácticas de conmutación dentro de los interruptores estáticos.

Los inversores pueden ser monobásicos o trifásicos y con salida en tensión o en corriente. Los inversores estáticos se utilizan en una gran variedad de aplicaciones como:

- calentamiento por inducción
- Regulación de velocidad de motores de corriente alterna (tanto síncronos como asíncronos)
- En sistemas de alimentación ininterrumpida o SAI (UPS en Inglés ininterrumpible power supplies)
- Para ordenadores y otros elementos, como electrodomésticos en nuestro caso

El sistema de alimentación de entrada puede ser una batería de acumuladores, células solares, pilas de combustible u otras fuentes de corriente continua como por ejemplo la salida de un rectificador fijo o controlado.

En nuestro proyecto sería la salida de un rectificador que sacaría una tensión en continua proporcional a la alterna que generaría el aerogenerador que a su vez dependerá de la velocidad del viento en ese instante de tiempo.

5.8.2. TIPOS DE ONDULADORES O INVERSORES.

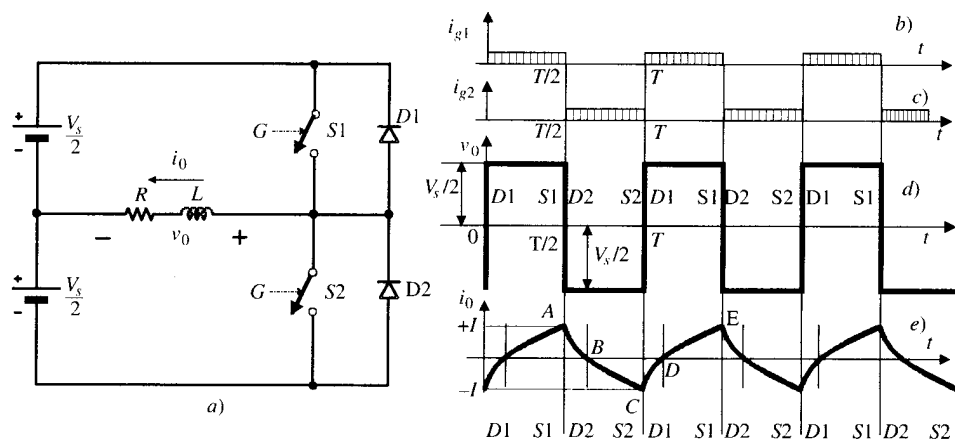
Se pueden distinguir tres configuraciones o topologías de inversores: con transformador de toma media con batería de toma media (medio puente) y configuración en puente completo. Corresponden a las tres formas más razonables de realizar la función de inversión de tensión o corriente suministrada por la fuente de CC con los medios disponibles hoy día en electrónica de potencia. Cada una de ellas tiene sus ventajas e inconvenientes.

5.8.2.1 Inversor monofásico de media onda.

La figura siguiente muestra una configuración de inversor en medio puente mostrándose también la forma de onda correspondiente. La alimentación es una fuente de continua doble con toma central y tensiones la mitad de V_s a cada lado del circuito. Los interruptores estáticos S1 y S2 pueden ser tiristores, GTO, transistores bipolares de unión (BJT) o MOSFET.

Los diodos D1 y D2 se utilizan como diodos de libre circulación para devolver la energía reactiva de la carga a la red de CC en los instantes en que están abiertos los interruptores estáticos S1 y S2.

Los interruptores estáticos se abren alternativamente cada medio periodo. En las figuras de abajo se muestran los impulsos de disparo que se envían a las puertas de los interruptores estáticos.



5.8.2.2 Inversor monofásico de puente completo.

La figura que se muestra a continuación se observa la configuración en puente completo. Del análisis del inversor en puente completo se puede intuir y deducir el funcionamiento del inversor anterior o medio puente. El inversor en puente completo está formado por 4 interruptores de potencia totalmente

controlados, típicamente transistores MOSFETs o IGBTs, tal y como se muestra en la figura:

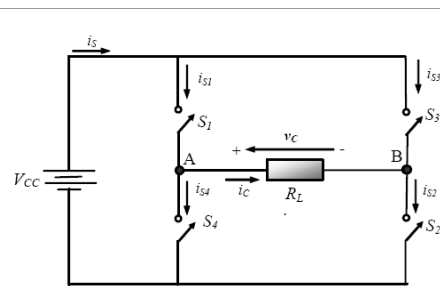


Figura 5.3. Inversor en puente completo.

La tensión de salida v_C puede ser $+V_{CC}$, $-V_{CC}$, ó 0 , dependiendo del estado de los interruptores.

Las siguientes figuras muestran los circuitos equivalentes para algunas de las posibles combinaciones de los interruptores. La tabla siguiente muestra la tensión de salida que se obtiene al cerrar determinadas parejas de interruptores.

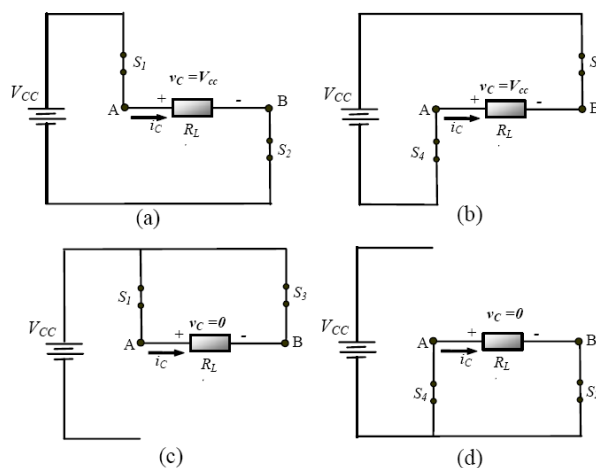


Figura 5.4. Circuitos equivalentes del inversor en puente completo: (a) S_1 y S_2 cerrados. (b) S_3 y S_4 cerrados. (c) S_1 y S_3 cerrados. (d) S_2 y S_4 cerrados.

Interruptores cerrados	Tensión de salida v_C
S_1 y S_2	$+V_{cc}$
S_3 y S_4	$-V_{cc}$
S_1 y S_3	0
S_2 y S_4	0

Observe que S_1 y S_4 no deberían estar cerrados al mismo tiempo, ni tampoco S_2 y S_3 para evitar un cortocircuito en la fuente de continua. Los interruptores reales no se abren y se cierran instantáneamente, por tanto debe tenerse en cuenta los tiempos de conmutación al diseñar el control de los interruptores. El solapamiento de los tiempos de conducción de los interruptores resultaría en un circuito denominado, en ocasiones, fallo de solapamiento en la

fuentes de tensión continua. El tiempo permitido para la conmutación se denomina tiempo muerto ("blanking time").

Para obtener una tensión de salida v_C igual a cero se pueden cerrar al mismo tiempo los interruptores S_1 y S_3 o bien S_2 y S_4 . Otra forma de obtener una tensión cero a la salida sería eliminando las señales de control en los interruptores, es decir, manteniendo abiertos todos los interruptores.

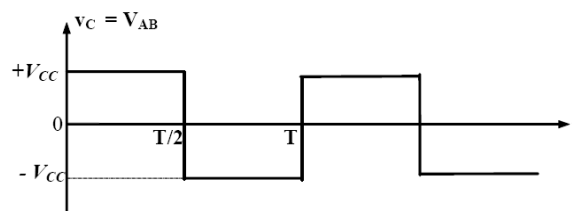
5.8.2.3 El inversor con modulación por onda cuadrada.

La técnica de modulación o el esquema de conmutación más sencillo del inversor en puente completo es el que genera una tensión de salida en forma de onda cuadrada. En éste caso los interruptores conectan la carga a $+V_{CC}$ cuando S_1 y S_2 están cerrados (estando S_3 y S_4 abiertos) y a $-V_{CC}$ cuando S_3 y S_4 están cerrados (estando S_1 y S_2 abiertos).

La conmutación periódica de la tensión de la carga entre $+V_{CC}$ y $-V_{CC}$ genera en la carga una tensión con forma de onda cuadrada. Aunque esta salida alterna no es senoidal pura, puede ser una onda de alterna adecuada para algunas aplicaciones.

La forma de onda de la corriente en la carga depende de los componentes de la carga.

En la figura que se puede ver a continuación se muestra la forma de onda de la tensión de salida v_C para un inversor en puente de onda completa con modulación por onda cuadrada. Éste tipo de modulación no permite el control de la amplitud ni del valor eficaz de la tensión de salida, la cual podría variarse solamente si la tensión de entrada V_{CC} fuese ajustable.



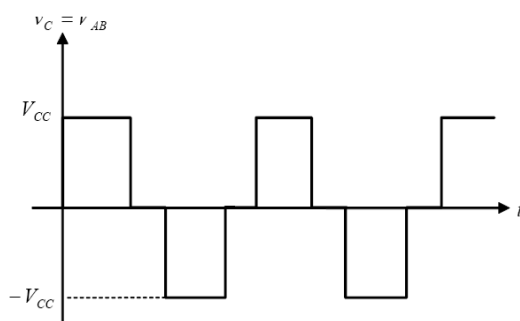
Formas de onda de tensión en la carga R_L del inversor en puente controlado por onda cuadrada.

5.8.2.4 Inversor con modulación por onda cuasi-cuadrada.

Para obtener la onda de la figura siguiente se realizaría la siguiente configuración con los interruptores.

Si se quiere tensión positiva en la carga se mantienen S1 y S2 conduciendo (S3 y S4 abiertos). La tensión negativa se obtiene de forma complementaria (S3 y S4 cerrados y S1 y S2 abiertos). Y, como ya se ha comentado, los intervalos de tensión nula se obtienen cerrando simultáneamente los interruptores S1 y S3 manteniendo S2 y S4 abiertos o bien cerrando S2 y S4 mientras S1 y S3 se mantienen abiertos.

Otra forma de obtener tensión nula a la salida es manteniendo todos los interruptores abiertos durante el intervalo de tiempo deseado.



. Formas de onda de tensión en la carga R_L del inversor en puente completo controlado por cancelación de tensión (modulación por onda casi-cuadrada).

5.8.2.5 Control por modulación de anchura de pulsos PWM.

Si se quiere mejorar aún más el contenido de armónicos en la salida de un inversor, es necesario utilizar lo que se conoce como modulación de anchura de pulsos PWM ("Pulse Width Modulation"). La idea básica es comparar una tensión de referencia senoidal de baja frecuencia (que sea imagen de la tensión de salida buscada) con una señal triangular simétrica de alta frecuencia cuya frecuencia determine la frecuencia de conmutación.

La frecuencia de la onda triangular (llamada portadora) debe ser, como mínimo 20 veces superior a la máxima frecuencia de la onda de referencia, para que se obtenga una reproducción aceptable de la forma de onda sobre una carga, después de efectuado el filtraje.

La señal resultante de dicha comparación nos generará la lógica para abrir y cerrar los semiconductores de potencia. La figura que a continuación se muestra se observa la modulación de una onda senoidal, produciendo en la salida una tensión con 2 niveles, cuya frecuencia es la de la onda triangular.

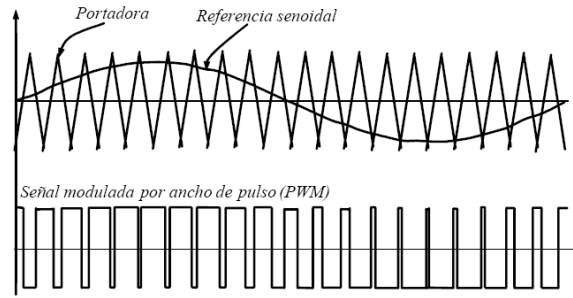
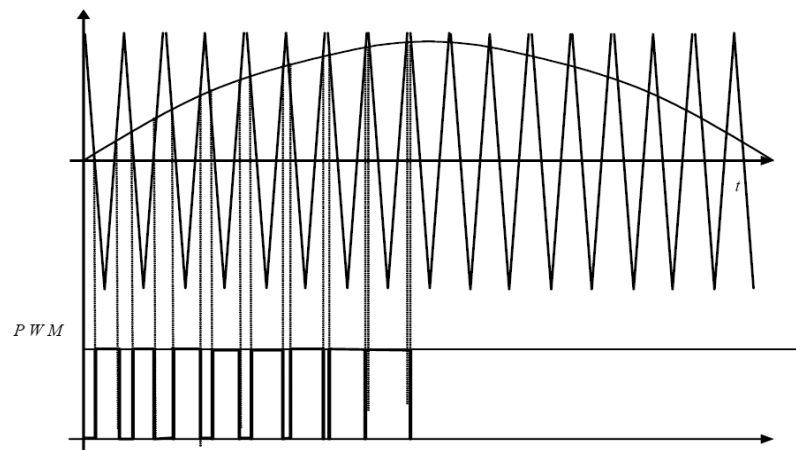
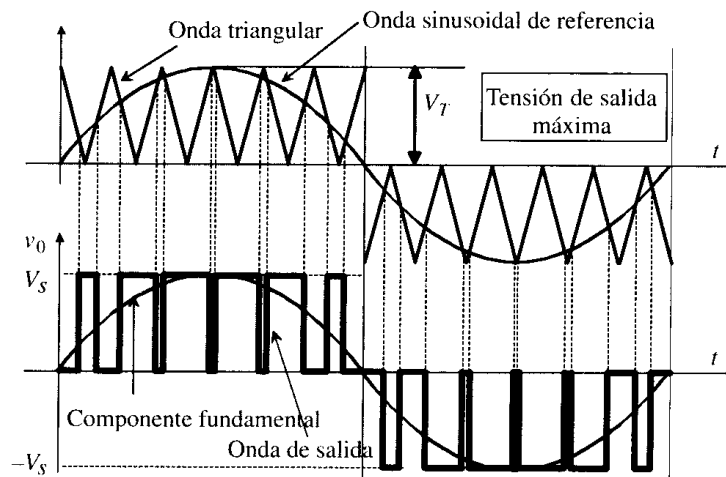


Figura 5.7. Generación de una señal PWM.

A partir de la señal PWM se generan los pulsos de apertura y cierre de los interruptores. Por ejemplo, si la señal PWM tiene un valor alto, se cierran los interruptores S1 y S2. En caso contrario se cierran los interruptores S3 y S4. Por tanto, la tensión de salida, que es aplicada a la carga, está formada por una sucesión de ondas rectangulares de amplitud igual a la tensión de alimentación en continua y duración variable. A continuación se muestra la generación de una señal PWM en un cuarto de senoide completa.

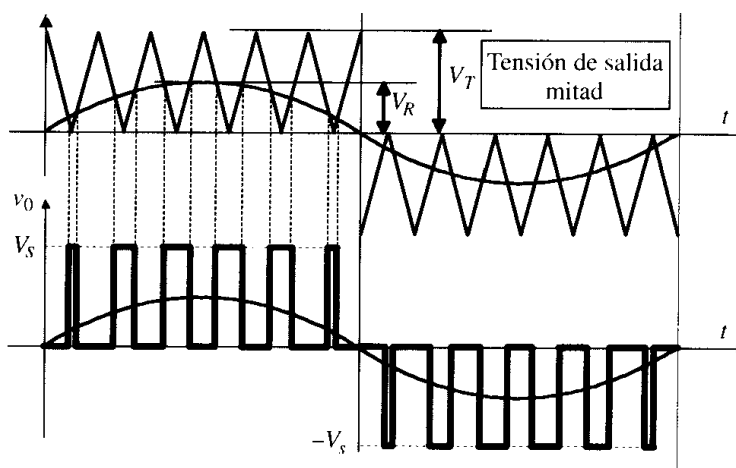


Matemáticamente se puede demostrar que el contenido de armónicos de la señal PWM generada es muy bajo en comparación con la onda cuadrada y cuasi-cuadrada.

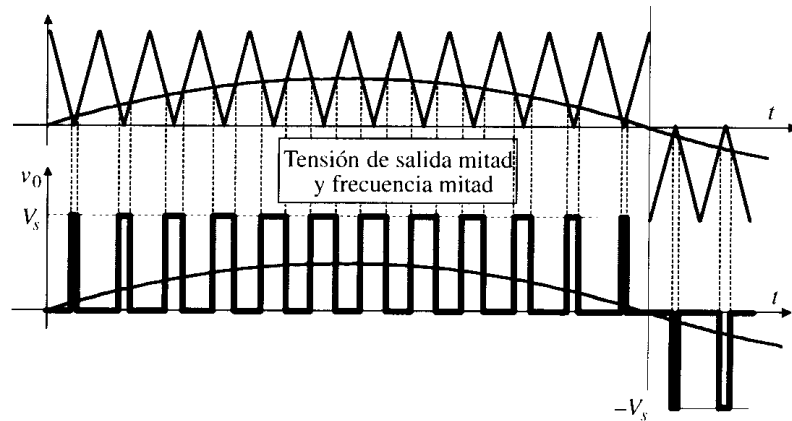


En el caso de la figura que se ha puesto arriba se ha considerado un índice de amplitud igual a 1 (es decir la onda senoidal de referencia tiene el mismo valor de pico que las ondas triangulares) y por ello la tensión de salida mostrada en la parte inferior tiene impulsos anchos y la componente fundamental de esta tensión más elevada que puede producir este inversor. Los impulsos de la tensión de salida varían entre $+V_S$ y $-V_S$ siendo ésta el valor de la tensión continua de la red de alimentación del inversor.

En el dibujo que se muestra a continuación la señal senoidal de referencia se ha reducido a la mitad, por lo que se consigue una onda fundamental en el inversor cuya amplitud es la mitad que en el caso anterior.



En este otro boceto se ha considerado una onda senoidal de referencia de amplitud mitad y de frecuencia mitad (doble período), y es por ello que el número de impulsos en cada semiperíodo se ha duplicado, dando lugar a una componente fundamental de mitad de amplitud y de frecuencia. Evidentemente, en los inversores trifásicos es necesario emplear tres ondas moduladoras senoidales desfasadas 120° para conseguir los instantes de disparo de los 6 interruptores estáticos que existen en el inversor.

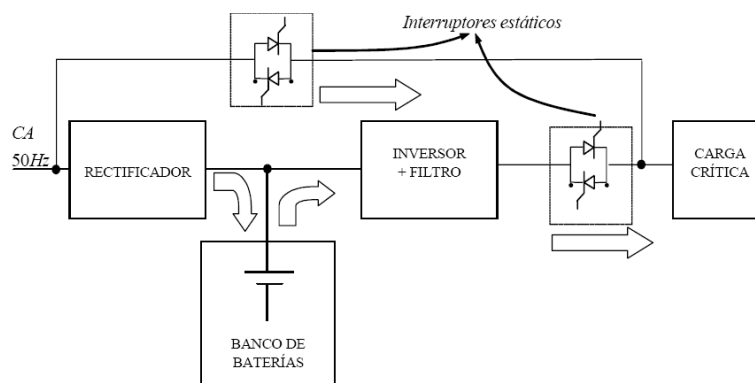


5.8.2.6 Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI).

Para alimentar cargas críticas, como son ordenadores que controlan procesos importantes, equipos médicos, etc., es necesario el empleo de sistemas de alimentación ininterrumpida, abreviados por las siglas SAIs (del inglés UPS, "Uninterruptible Power Supply").

Este tipo de sistemas proporciona protecciones frente a cortes de alimentación, así como regulación de tensión frente a fluctuaciones (por encima o por debajo) de los valores nominales. Además, se emplean como supresores de transitorios y de armónicos en la línea de alimentación.

La figura muestra un diagrama de bloques de un SAI. En modo normal de operación, la potencia suministrada a la carga proviene de la red de CA de la empresa suministradora. En caso de producirse una fluctuación en la línea (corte, sobretensión, etc.), la potencia es suministrada por el banco de baterías. Un SAI debe incluir un cargador de baterías, para mantener la batería cargada en cualquier momento.



Los interruptores estáticos, también denominados interruptores de "by-pass", permiten alimentar la carga a través del inversor en menos de $\frac{1}{4}$ ciclo cuando ocurre un fallo en la red eléctrica. Otra función de los interruptores

estáticos es la de aislar el inversor cuando se desea efectuar su mantenimiento. Básicamente existen dos posibilidades de implementar los interruptores estáticos: utilizando tiristores o relés electromecánicos.

En las soluciones de bajo coste se emplean, en general, relés. Su conmutación debe ser rápida, de modo que no interrumpan la alimentación durante más de $\frac{1}{2}$ ciclo. Cuando la potencia aumenta, el uso de tiristores es lo más habitual.

5.8.2.7 Inversores para este proyecto.

El inversor, tal y como se ha comentado en apartados anteriores, juega un papel importante en la instalación, ya que es el encargado en convertir la energía acumulada en las baterías en una de tipo alterna 220 V y 50 Hz.

Por ello se hace la comparación de tres inversores validos para la instalación. La única diferencia entre ellos es la potencia que suministran, que según las necesidades de la instalación se elegirá uno u otro. A continuación se muestra la fotografía de uno de ellos, ya que los tres son similares.



	<i>PRIMERA OPCIÓN</i>	<i>SEGÚNDA OPCIÓN</i>	<i>TERCERA OPCIÓN</i>
<i>Potencia (W)</i>	2000	1000	800
<i>Alimentación (Vdc)</i>	12/24	12/24	12/24
<i>Tensión salida (Vac)</i>	220	220	220
<i>Potencia máxima (W)</i>	4000	2000	1600
<i>Eficiencia (%)</i>	85	85	85
<i>Frecuencia (Hz)</i>	50/60	50/60	50/60
<i>Protección antiretorno</i>	Sí	Sí	Sí
<i>Alarma baja tensión en baterías</i>	Sí	Sí	Sí
<i>Protección sobrecarga</i>	Sí	Sí	Sí
<i>Dimensiones (mm)</i>	340*150*90	265*152*72	265*152*72
<i>Peso (Kg.)</i>	3.5	2.2	2
<i>PRECIO (euros)</i>	190	88	62

CAPÍTULO

6

CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES.

6.2. MONTAJE DEL AEROGENERADOR.

6.3. LINEAS FUTURAS.

6.1 CONCLUSIONES.

En el proyecto que se ha expuesto en las páginas atrás se hacen las siguientes conclusiones:

- Se han construido unas palas de 1.5 m debido a que en un principio se optó por maximizar la potencia extraída del viento. Como la velocidad media del viento en la localidad en la que iba a estar instalado el aerogenerador era baja, de unos 5, 6 m/s, se pensó que era mejor construirlas de 1,5 m que de 1m.
- Los imanes se calcularon para obtener el mayor flujo posible en el entrehierro sabiendo que el estator al ser de acero al silicio saturaba a 1,5 T.
- Para poder acoplar la velocidad de las palas y la del generador se ha usado una reductora mecánica, la cual permite, reducir la velocidad de giro del generador y mantener la velocidad óptima de las palas (λ y C_p óptimos), esta reductora al disminuir la velocidad que llega al generador aumenta también el par, ya que la potencia debe permanecer constante. Se optó por éste sistema en lugar de las otras posibilidades debido a que presentaba unos resultados óptimos de operación, no requiere ningún tipo de control y su construcción y montaje no presentan dificultad ya que se dispone de las partes que la constituyen.
- El generador aporta la potencia en trifásica y alterna, dado que ésta forma de potencia no se puede utilizar en este sistema ya que se trata de cargar unas baterías, por lo que se coloca un puente de diodos trifásico que convierte ésta señal en continua, que sí se podrá utilizar para cargar las baterías.
- Una vez que la energía está almacenada en las baterías ésta se convierte a 230 V 50 Hz monofásica, mediante la ayuda de un inversor, ó en el caso de la iluminación se mantiene en tensión continua desde las baterías.

6.2. MONTAJE DEL AEROGENERADOR.

A continuación se muestran una serie de fotografías en las que se observa el proceso que se siguió para hacer el montaje del aerogenerador.

En primer lugar una vez que te colocabas en la plataforma del aerogenerador había que tomar alguna medida de protección, aunque no se observe bien en la fotografía había una especie de arnés anti caída que estaba bien sujeto a la plataforma del aerogenerador.



Una vez que la persona que estuviese trabajando ya estuviera segura se procedió a subir el generador y a su posterior colocación en la base del mástil, este proceso se realizó con la ayuda de una cuerda y un gancho, tal y como se ve en la siguiente imagen:



Una vez que el generador de imanes permanentes ya estuviese bien anclado se procedió a subir las palas, éstas ya estaban unidas a la chapa de acero, la cual iba a servir para su ensamblaje con el generador, el proceso que

se siguió para subir las palas fue el mismo que para el del generador, tal y como a continuación se observa:



6.3. LINEAS FUTURAS.

Evidentemente este proyecto como cualquier otro, puede ser objeto de mejoras ya que tiene muchas piezas, sistemas eléctricos y mecánicos. Desde el punto de vista del proyectante, éste ha sido un trabajo completo en muchas ramas, ya que se han realizado labores muy variadas como son:

- Trabajo con madera para hacer las palas.
- Con barniz para la protección de las palas.
- Con estructuras metálicas para la construcción de la base del generador.
- Con chapas metálicas para la fabricación de la veleta y unión de las palas.
- Con lijas, limas y mas tipos de herramientas para dejar buenos acabados.
- Con imanes para realizar el rotor del aerogenerador.
- Sistemas mecánicos como son reductora, frenado, pivotamiento ...

Se han mencionado algunos de las labores que se tuvieron que hacer para la construcción del aerogenerador. Evidentemente al haber tratado tantos campos diferentes de trabajo es fácil poder mejorar cosas en cualquier campo, unas posibles mejoras que serían factibles:

- Conseguir un generador con más número de pares de polos para conseguir así velocidades de trabajo menores.
- En el caso de no conseguir un generador con tantos números de pares de polos hacer un rebobinado manual del estator para conseguir más polos.
- Incorporación de más automatismos regulados por electrónica.
- Automatismos para por ejemplo, el freno de las palas.
- Control remoto de los diversos parámetros del aerogenerador (velocidad de viento, corriente generada por el molino en un preciso instante de tiempo, funcionamiento del freno etc).
- Mejorar la bajada de corriente eliminando la escobilla.
- Disminuir el peso del conjunto, ya que a la hora de hacer toda la estructura del aerogenerador se han sobredimensionado todas las piezas metálicas para evitar posibles roturas.

Dentro de los inconvenientes encontrados en la realización de este proyecto, surge la diferencia de tensión entre el generador, o el rectificador, y las baterías que origina una situación parecida al cortocircuito, si bien es cierto que a bajas revoluciones, como va a ser la situación habitual en el aerogenerador debido a los vientos predominantes en la zona, el generador no dará tanta tensión como a altas revoluciones, la necesidad de aprovechar toda la energía suministrada por el viento hace que la optimización de este parámetro sea algo muy a tener en cuenta.

En tal caso, surgen dos variantes entrelazadas para la variar la diferencia de tensión, las baterías y el generador.

- Estudio de la posibilidad de conectar baterías en serie en lugar de en paralelo. De esta forma aumenta la tensión de la alimentación de los 12 voltios de este proyecto a un valor múltiplo de este dependiendo de las baterías conectadas, 12v, 24v, 36v, 48v...
- Estudio de la posibilidad de conectar el generador en estrella o triángulo. En estrella, a bajas velocidades tendremos más voltaje en el

generador, aprovechando en mayor grado las bajas velocidades del viento. En triángulo en cambio, habrá menor tensión entre bornes que en estrella. Quizá aquí surja el problema de armónicos en la configuración en triángulo.

- Estudio de la posibilidad de adoptar la configuración en triángulo del generador, y en tal caso el estudio asociado sobre la realización de la técnica de paso acortado para la reducción del tercer armónico asociado al triángulo.
- Estudio de la posibilidad de añadir un conmutador estrella-triángulo para aprovechar las diferentes velocidades del viento.
- Utilización de circuitos electrónicos para:
 1. Protección de las baterías ante sobrecargas y excesos de descarga, ya que tanto una como la otra son perjudiciales para las baterías.
 2. Reducir el valor de tensión mediante el uso de reguladores de tensión o puente de tiristores.
 3. Cuadro de control que indique el estado de las baterías en todo momento, indicando cuando están en sobrecarga o exceso de descarga.

CAPÍTULO

7

ANEXOS

7.1. PRESUPUESTO.

7.2. CURVAS DE POTENCIA.

7.3. HERRAMIENTAS.

7.4. LINEAS FUTURAS. POSIBLES MEJORAS.

7.4. PROBLEMAS CAUSAS Y SOLUCIONES EN LOS AEROGENERADORES.

7.5. BIBLIOGRAFIA

7.6. PLANOS

7.1. PRESUPUESTO.

7.1.1. INTRODUCCIÓN.

En este apartado se va a realizar un listado de todos los gastos que se han ido realizando a lo largo del proyecto. Cabe comentar que hay muchos elementos que se han utilizado que ya se disponían con anterioridad, y es por ello que el presupuesto resulta algo más corto. Un claro ejemplo son las baterías, éstas resultan indispensables en la instalación ya que gracias a ellos se podrá disponer de energía eléctrica en momentos en los que no haya producción de energía.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el mantenimiento a realizar a todo el conjunto como pueden ser el engrasar las piezas móviles, como cojinetes bujes etc, o de rellenar de agua destilada las baterías, aunque el mantenimiento no se incluya en el presupuesto, es un gasto que hay que tener en cuenta en un futuro. Éste gasto puede ser casi insignificante, en el caso que el aerogenerador trabaje sin problemas, o puede ser importante, en el caso que ocurra alguna avería en el conjunto.

7.1.1.1 Cuadro del presupuesto del proyecto.

En la Tabla se muestra una estimación de la inversión del proyecto. La tabla hace diferencias entre los componentes comprados y fabricados.

COMPONENTES COMPRADOS	PRECIO (€)
Imanes	180
Cuadro Control	75,56
Inversor	190
Rectificador Trifásico	54,15
Pegamento Araldit Bi componente	15,3
Masilla	5,09
Otros: tornillos, tuercas, arandelas ...	35
COMPONENTES FABRICADOS	PRECIO (€)
Listones madera (palas)	13,50 x 3
Torneado y Fresado	200
TOTAL PRESUPUESTO 795,6 €	

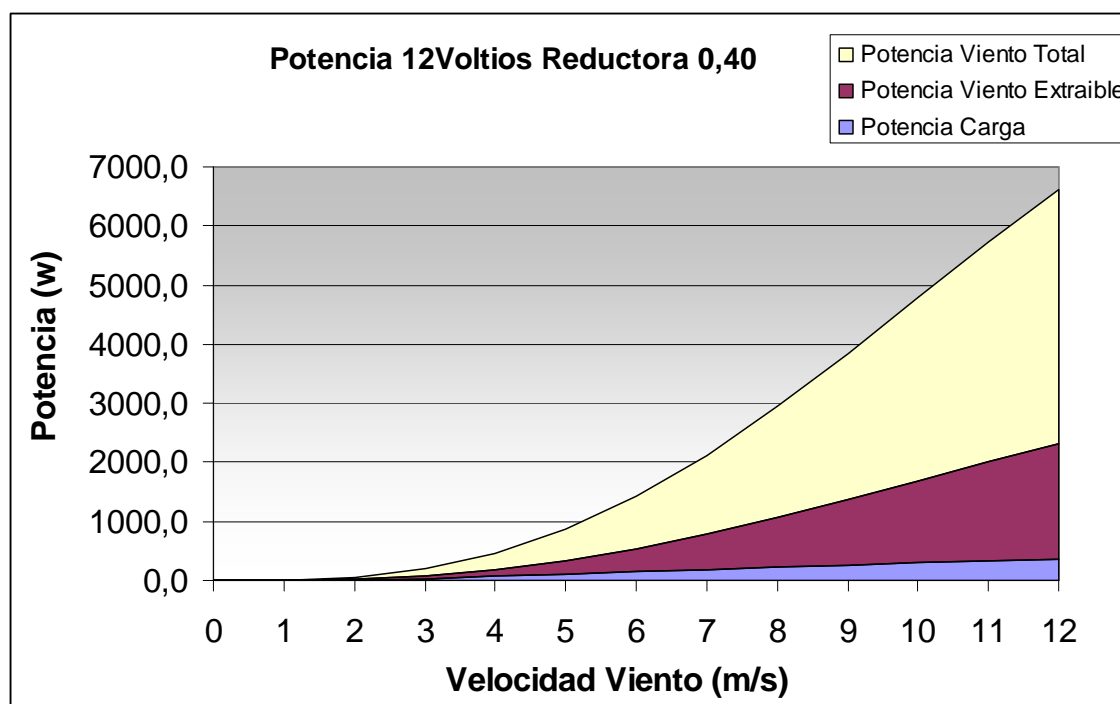
7.2. CURVAS DE POTENCIA.

7.2.1. INTRODUCCIÓN.

En este apartado se muestran las curvas de potencia frente a la velocidad del viento, para el aerogenerador referentes a una instalación con rectificador trifásico y la reductora correspondiente para la configuración de 12 y 24 voltios.

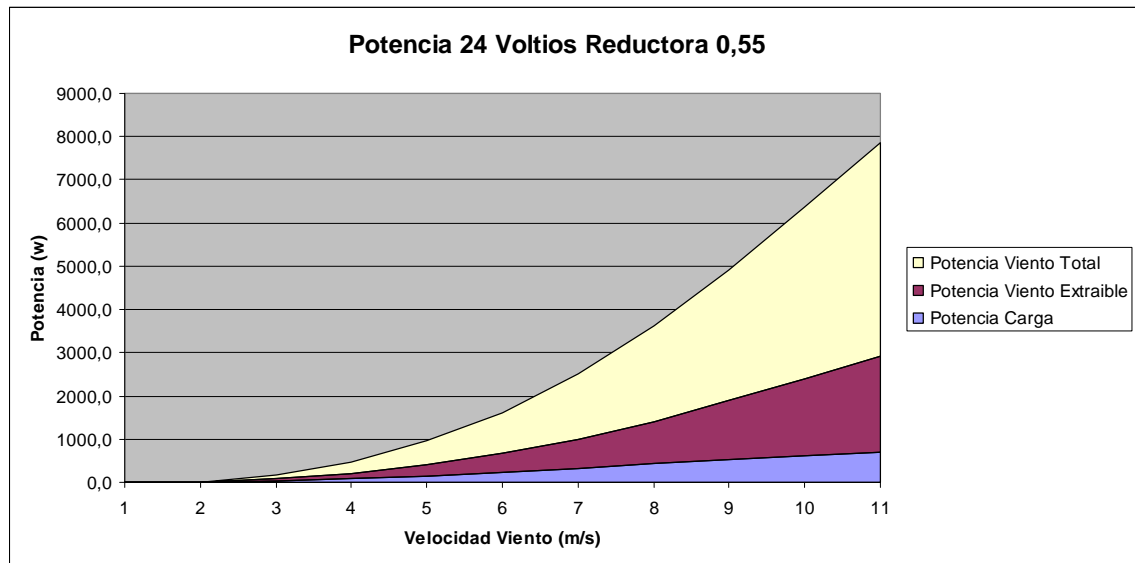
7.2.1.1 Curva de potencia para 12 voltios.

Vv	Potencia Viento extraíble	Potencia Viento total	Irect	Vbat	Potencia Carga
0	0,0	0,0	0,0	12,0	0,0
1	0,1	0,2	0,1	12,0	0,6
2	10,4	23,2	0,8	12,0	9,1
3	49,3	109,6	2,9	12,0	35,2
4	121,7	270,5	5,4	12,1	65,5
5	235,4	523,1	8,4	12,1	101,6
6	395,0	877,7	11,6	12,2	141,7
7	600,2	1333,7	15,0	12,2	184,0
8	845,8	1879,4	18,4	12,3	226,2
9	1108,0	2462,2	21,5	12,3	265,4
10	1388,5	3085,6	24,4	12,4	302,7
11	1669,2	3709,2	27,1	12,4	336,8
12	1939,5	4310,1	29,4	12,5	367,1
13	2202,2	4893,7	31,6	12,5	394,8
14	2452,8	5450,6	33,5	12,5	419,8
15	2688,7	5974,9	35,2	12,6	442,3
16	2911,9	6470,8	36,8	12,6	462,8
17	3121,6	6936,8	38,2	12,6	481,4
18	3314,2	7364,8	39,4	12,6	498,0
19	3490,1	7755,8	40,5	12,6	512,8
20	3650,7	8112,7	41,5	12,7	526,0



7.2.1.2 Curva de potencia para 24 voltios.

Vv	Potencia Viento extraíble	Potencia Viento total	Irect	Vbat	Potencia Carga
1	0,0	0,0	0,0	24,0	0,0
2	0,7	1,6	0,3	24,0	7,2
3	40,0	88,9	1,5	24,0	35,9
4	120,4	267,6	3,8	24,1	91,2
5	245,5	545,5	6,6	24,1	159,1
6	428,5	952,1	9,9	24,2	239,1
7	676,6	1503,5	13,6	24,2	328,6
8	989,7	2199,3	17,6	24,3	426,6
9	1364,7	3032,7	21,4	24,3	521,7
10	1781,3	3958,3	25,3	24,4	616,4
11	2220,4	4934,3	28,8	24,5	705,6
12	2615,1	5811,2	31,8	24,5	778,6
13	2989,9	6644,2	34,4	24,6	844,0
14	3314,3	7365,2	36,5	24,6	897,2
15	3601,0	8002,2	38,3	24,6	942,3
16	3857,7	8572,7	39,8	24,6	981,2
17	4085,6	9079,2	41,2	24,7	1014,8
18	4288,7	9530,3	42,3	24,7	1043,8
19	4473,8	9941,7	43,3	24,7	1070,1
20	4637,1	10304,7	44,2	24,7	1092,7



7.3. HERRAMIENTAS.

Las herramientas utilizadas para la construcción del generador de imanes permanentes fueron los siguientes:

7.3.1. SARGENTOS.

Un sargento, gato o tornillo de apriete es una herramienta manual que sirve para sujetar firmemente dos o más piezas que van a ser mecanizadas o pegadas entre si. También se utilizan para sujetar firmemente la pieza en la que vayamos a trabajar sobre el banco o mesa de trabajo. En general, su mecanismo se basa en dos mandíbulas unidas por una guía que son las que presionan las piezas. La presión se consigue mediante la utilización de un husillo o tornillo en una de ellas (o en las dos). Hay sargentos con las dos mandíbulas ajustables, con una ajustable y una fija e incluso con las dos mandíbulas formando una pieza fija con la guía. La mandíbulas ajustables se fijan mediante un tope de retención, un mecanismo de freno o por simple apalancamiento sobre la guía. Pero también existen mecanismos más complejos para diferentes aplicaciones.



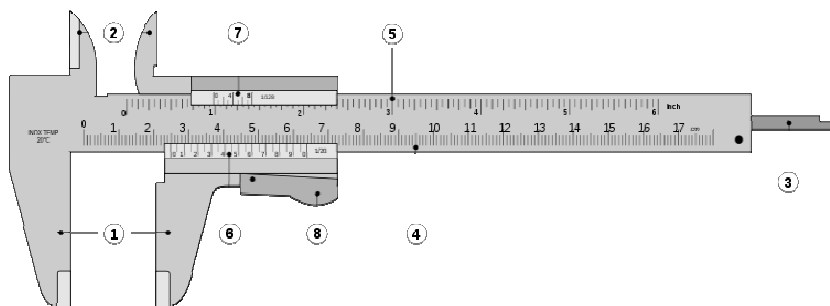
7.3.2. CALIBRE O PIE DE REY.

Este es un instrumento de medición objetos relativamente pequeños, desde centímetros hasta fracciones de milímetros ($1/10$ de milímetro, $1/20$ de milímetro, $1/50$ de milímetro). En la escala de las pulgadas tiene divisiones equivalentes a $1/16$ de pulgada, y, en su nonio de $1/128$ de pulgada.

Es un instrumento sumamente delicado y debe manipularse con habilidad, cuidado y delicadeza, con precaución de no rayarlo ni doblarlo (en especial, la coliza de profundidad). Deben evitarse especialmente las limaduras, que pueden alojarse entre sus piezas y provocar daños.

A continuación se muestra la figura de un pie de rey en la que se pueden ver las partes del calibre, como: mordazas, los nonios, palpador para medir profundidad etc. Este instrumento se utilizó para medir entre otras cosas, el diámetro inicial del rotor.

Se hizo esto porque el entrehierro del generador se quería que fuese el mismo que el del motor de jaula de ardilla.



7.3.3. TORNO.

Se denomina torno a un conjunto de máquinas herramienta que permiten mecanizar piezas de forma geométrica de revolución. Estas máquinas-herramienta operan haciendo girar la pieza a mecanizar mientras una o varias herramientas de corte son empujadas en un movimiento regulado de avance contra la superficie de la pieza, cortando la viruta de acuerdo con las condiciones tecnológicas de mecanizado adecuadas. Desde el inicio de la Revolución industrial, el torno se ha convertido en una máquina básica en el proceso industrial de mecanizado.

Esta maquina se ha utilizado para rebajar el diámetro del rotor a 92 mm ya que se necesita un cierto espacio para introducir los imanes y las abrazaderas.

Otra de las cosas que se han hecho con esta maquina herramienta son los 4 casquillos, éstos se harán a partir de un bloque en el que una vez que se hayan conseguido las especificaciones del plano se dividirá en 4 para formar los 4 casquillos.



7.3.4. FRESADORA.

Una fresadora es una máquina herramienta utilizada para realizar mecanizados por arranque de viruta mediante el movimiento de una herramienta rotativa de varios filos de corte denominada fresa. En las fresadoras tradicionales, la pieza se desplaza acercando las zonas a mecanizar a la herramienta, permitiendo obtener formas diversas, desde superficies planas a otras más complejas.

A diferencia del torno ésta máquina si que permite realizar trabajos que no sean disminuir diámetro tanto es así que para hacer las 24 ranuras en las que se van a alojar los imanes se utilizó este tipo de maquina.

Una ventaja que tiene el uso de la fresadora es que posee una gran exactitud en el trabajo, y eso es justo lo que se requiere ya que las tolerancias que debe haber en la ranuras es de décimas.



7.4. LINEAS FUTURAS. POSIBLES MEJORAS.

Evidentemente este proyecto como cualquier otro, puede ser objeto de mejoras ya que tiene muchas piezas, sistemas eléctricos y mecánicos. Desde el punto de vista del proyectante, este ha sido un trabajo completo en muchas ramas, ya que se han realizado labores muy variadas como son:

- Trabajo con madera para hacer las palas.
- Con barniz para la protección de las palas.
- Con estructuras metálicas para la construcción de la base del generador.
- Con chapas metálicas para la fabricación de la veleta y unión de las palas.
- Con lijas, limas y más tipos de herramientas para dejar buenos acabados.
- Con imanes para realizar el rotor del aerogenerador.

Se han mencionado algunos de las labores que se tuvieron que hacer para la construcción del aerogenerador. Evidentemente al haber tratado tantos campos diferentes de trabajo es fácil poder mejorar cosas en cualquier campo, unas posibles mejoras que serían factibles:

- Construcción de una multiplicadora para conseguir velocidades mayores.
- Conseguir un generador con más número de pares de polos para conseguir así velocidades de trabajo menores.
- En el caso de no conseguir un generador con tantos números de pares de polos hacer un rebobinado manual del estator para conseguir más polos.
- Incorporación de más automatismos regulados por electrónica.
- Automatismos para por ejemplo, el freno de las palas.
- Control remoto de los diversos parámetros del aerogenerador (velocidad de viento, corriente generada por el molino en un preciso instante de tiempo, funcionamiento del freno etc).
- Mejorar la bajada de corriente eliminando la escobilla.
- Disminuir el peso del conjunto, ya que a la hora de hacer toda la estructura del aerogenerador se han sobredimensionado todas las piezas metálicas para evitar posibles roturas.

Dentro de los problemas encontrados en la realización de este proyecto, surge la diferencia de tensión entre el generador, o el rectificador, y las baterías que origina una situación parecida al cortocircuito, si bien es cierto que a bajas revoluciones, como va a ser la situación habitual en el aerogenerador debido a los vientos predominantes en la zona, el generador no dará tanta tensión como a altas revoluciones, la necesidad de aprovechar toda la energía suministrada por el viento hace que la optimización de este parámetro sea algo muy a tener en cuenta.

En tal caso, surgen dos variantes entrelazadas para la variar la diferencia de tensión, las baterías y el generador.

- Estudio de la posibilidad de conectar baterías en serie en lugar de en paralelo. De esta forma aumenta la tensión de la alimentación de los 12 voltios de este proyecto a un valor múltiplo de este dependiendo de las baterías conectadas, 12v, 24v, 36v, 48v...

- Estudio de la posibilidad de conectar el generador en estrella o triángulo. En estrella, a bajas velocidades tendremos más voltaje en el generador, aprovechando en mayor grado las bajas velocidades del viento. En triángulo en cambio, habrá menor tensión entre bornes que en estrella. Quizá aquí surja el problema de armónicos en la configuración en triángulo.
- Estudio de la posibilidad de adoptar la configuración en triángulo del generador, y en tal caso el estudio asociado sobre la realización de la técnica de paso acortado para la reducción del tercer armónico asociado al triángulo.
- Estudio de la posibilidad de añadir un conmutador estrella-triángulo para aprovechar las diferentes velocidades del viento.

7.4. PROBLEMAS CAUSAS Y SOLUCIONES EN LOS AEROGENERADORES.

Problema observado	Causa posible	Solución
Las aspas no giran Incluso con un viento Fuerte	Cableado desde el aerogenerador al rectificador incorrecto Freno manual conectado Cortocircuito en las fases del generador Diodos del rectificador en cortocircuito	Revisar cableado Desconectar el freno auxiliar Desconectar las fases del aerogenerador del regulador, si este no gira libremente, el problema puede estar en el cableado. Revisar las posibles uniones en el cableado. Desconectar las fases del aerogenerador del regulador, si este gira libremente, el regulador puede estar averiado.
Las aspas giran muy rápido y no carga	Batería desconectada o defectuosa. Voltaje incorrecto entre baterías, regulador y aerogenerador. Fases del aerogenerador desconectadas.	Comprobar que el voltaje de las baterías es correcto y que existe voltaje en la entrada del aerogenerador en el regulador. Si no hay voltaje revisar el cableado.

El aerogenerador se frena automáticamente con poco viento	Las baterías pueden estar siendo cargadas por otros equipos como paneles solares.	El funcionamiento es correcto.
Hace mucho viento y no se frena el aerogenerador, con el freno del regulador activado.	El viento es tan fuerte que el freno del regulador no puede llegar a frenar la máquina.	Accionar el freno intermitentemente hasta frenar la máquina, aprovechando las bajadas de la fuerza del viento
La pantalla analógica del regulador no muestra nada.	Batería desconectada Circuito del regulador estropeado	Revisar cableado en la parte de continua. Y comprobar que llega tensión al regulador Revisar conectores en el regulador
El regulador se calienta mucho	Baterías demasiado pequeñas y/o muy poco consumo Situación con vientos fuertes	Revisar el dimensionado de su instalación El funcionamiento es correcto, Se puede frenar el aerogenerador si su baterías está cargada
El voltaje de las baterías es demasiado alto	Conexión defectuosa de la batería.	Revisar los bornes de conexionado de la batería/elementos. Reapriete la tornillería de las conexiones.
El voltaje de las baterías es demasiado alto (continuación)	El regulador no está trabajando correctamente.	
El aerogenerador vibra	Tornillos flojos Palas descompensadas	Reapretar toda la tornillería. Revisar el estado de las palas.

Hace ruido mecánico intermitentemente	Roce entre elementos Ruido interior, revisar si el rotor gira correctamente o si los rodamientos pueden estar dañados	Colocar y apretar correctamente los tornillos de la carcasa Cambiar rodamientos
Hace mucho viento y se desorienta constantemente	Turbulencias	Revisar el lugar de instalación de la torre

7.5. BIBLIOGRAFIA.

A continuación se enumera la bibliografía utilizada en el dimensionamiento del aerogenerador, manuales y hojas de especificaciones de distintos componentes, enlaces de páginas webs de tiendas en las que se adquirieron los distintos elementos del montaje.

“Energía renovable práctica, editorial Pamiela. Edición 2003” Iñaki y Sebastián Urkia Lus.

“Máquinas eléctricas, quinta edición. Editorial McGraw Hill, 2003” Jesús Fraile Mora.

“Máquinas eléctricas, tercera edición .Editorial McGraw Hill” Stephen J. Chapman.

“Electrónica de Potencia - Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1993”. Muhammad H. Rashid.

“Power Electronics. Converters, Applications, and Design (2ª edición), Editorial: John Wiley & Sons, 1995”. N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins.

“Apuntes Asignatura Energías Renovables (Perfiles Aerodinámicos) Por la Universidad Pontificia de Comillas de MADRID”.

Apuntes de la asignatura “Accionamiento Eléctricos” impartida por Jesús López. Universidad Pública de Navarra.

Apuntes de la asignatura “Máquinas Eléctricas I” impartida por José Luis Rodríguez. Universidad Pública de Navarra

Apuntes de la asignatura "Máquinas Eléctricas II" impartida por Pablo Sanchís. Universidad Pública de Navarra

Tutorial JMAG.- Studio "Electromagnetic Field Analysis Software" Versión 9.1.

7.5.1 SOFTWARE INFORMÁTICO UTILIZADO:

PSIM y MATLAB para simular circuitos y realizar cálculo matemático respectivamente.

MICROSOFT EXCEL 2003 para realizar gráficas a partir de una tabla de datos.

AUTODESK INVENTOR y CATIA para diseñar todas las posibles formas de sujeción de los imanes, para realizar los dibujos en 3D, y realizar planos para su posterior fabricación el catia se ha usado para la realización de los planos de las palas y reductora.

AUTOCAD 2008 para exportar el dibujo del rotor al JMAG-Studio

JMAG para realizar simulación del campo magnético creado por los imanes

7.5.2. DIRECCIONES WEB:

Web de la tienda de los imanes: <http://www.supermagnete.es>

Web en la que aparece el regulador de tensión y voltaje que se utiliza en este caso: <http://www.laventanasolar.es/>

Web en la que aparecen características técnicas de la iluminación: <http://bliipposol.es/tienda/regleta-con-fluorescente-para-12v-p-439.html>

Web explicativa de aerogeneradores: <http://guidedtour.windpower.org>

Web de rectificadores trifásicos: <http://www.diotronic.com>

Web de Transformación de un Motor de Jaula De Ardilla en Generador Eléctrico <http://www.uv.es/~navasqui/aero/Motor2Cv.pdf>.

Web de datos meteorológicos para los datos de viento en la localidad de Lerín:

<http://atlaseolico.idae.es>.

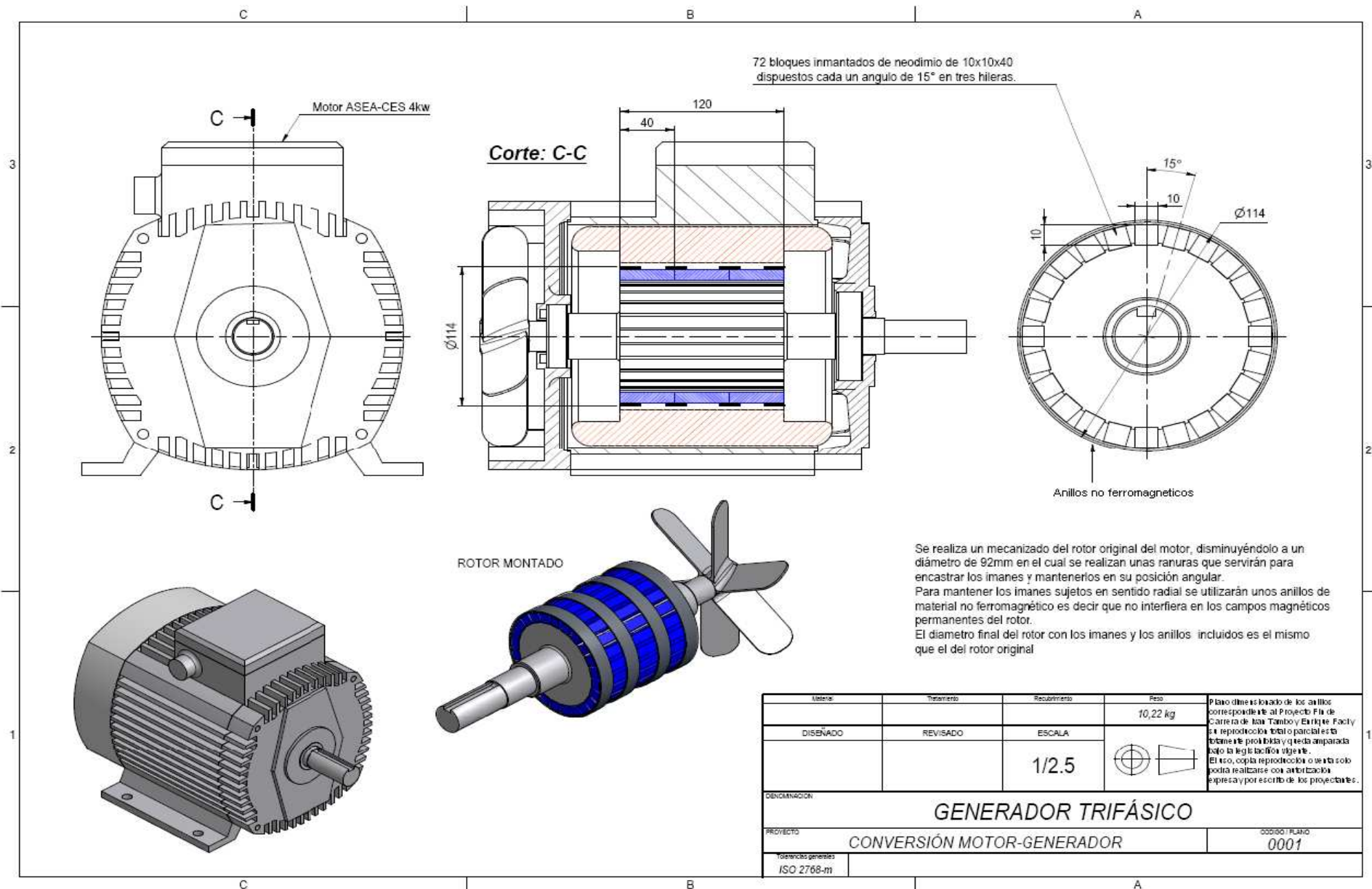
Web de transformadores e inductancias:

<http://www.eremu.es/web/trifasicos.aspx>

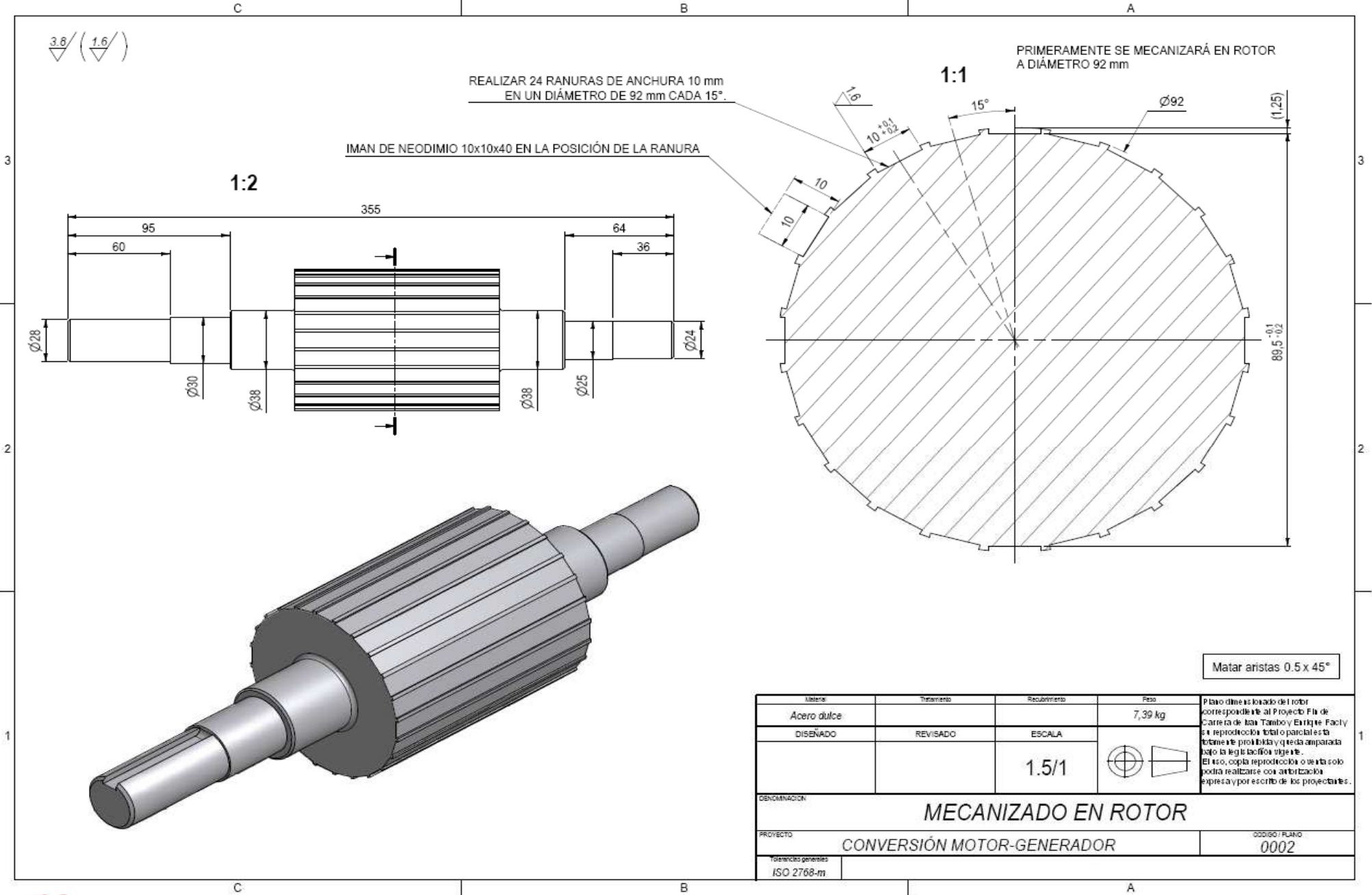
Web para inversores de corriente

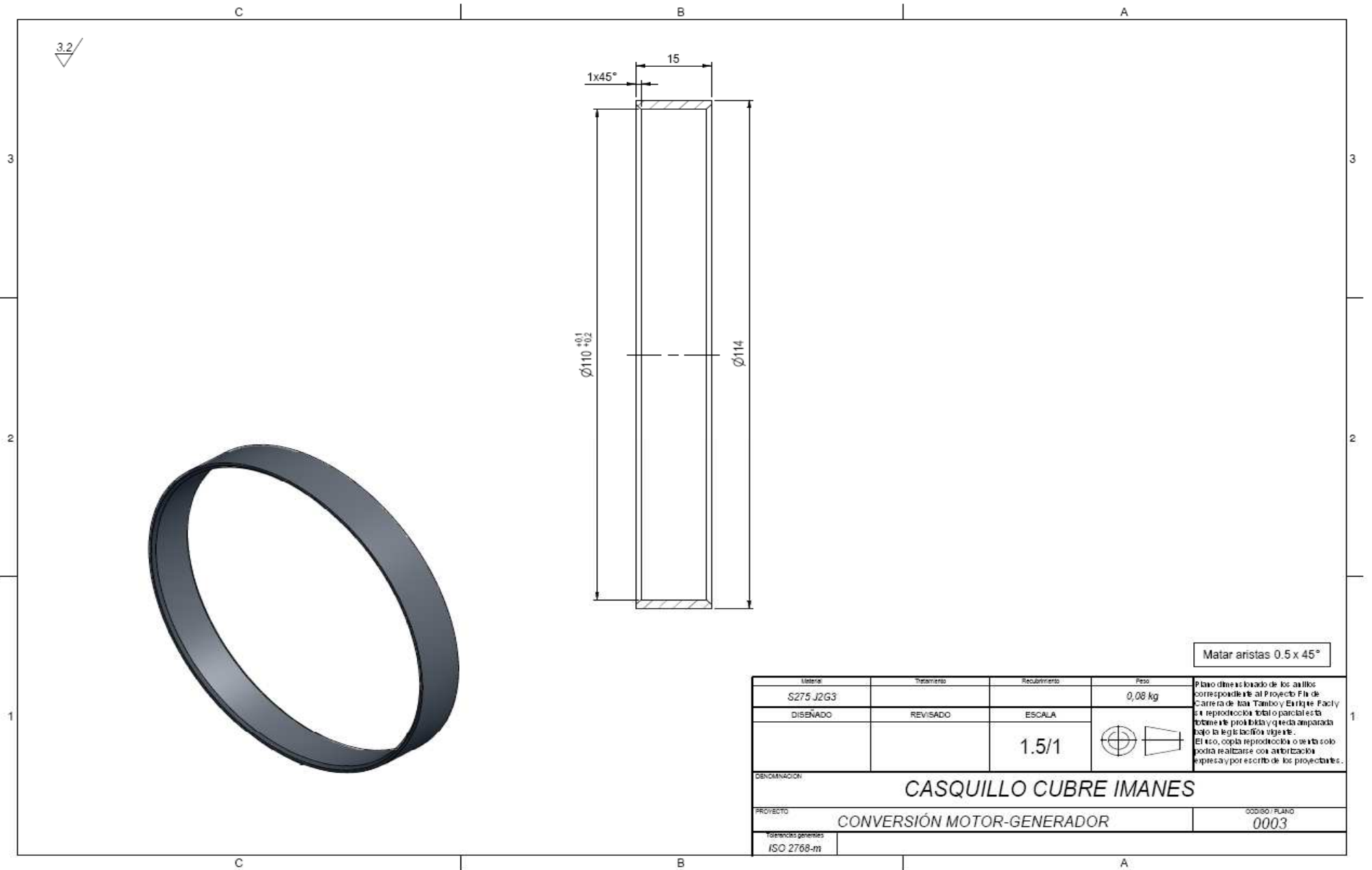
<http://www.plasma4x4.com/catalogo/inversores-de-corriente.html>

7.6. PLANOS

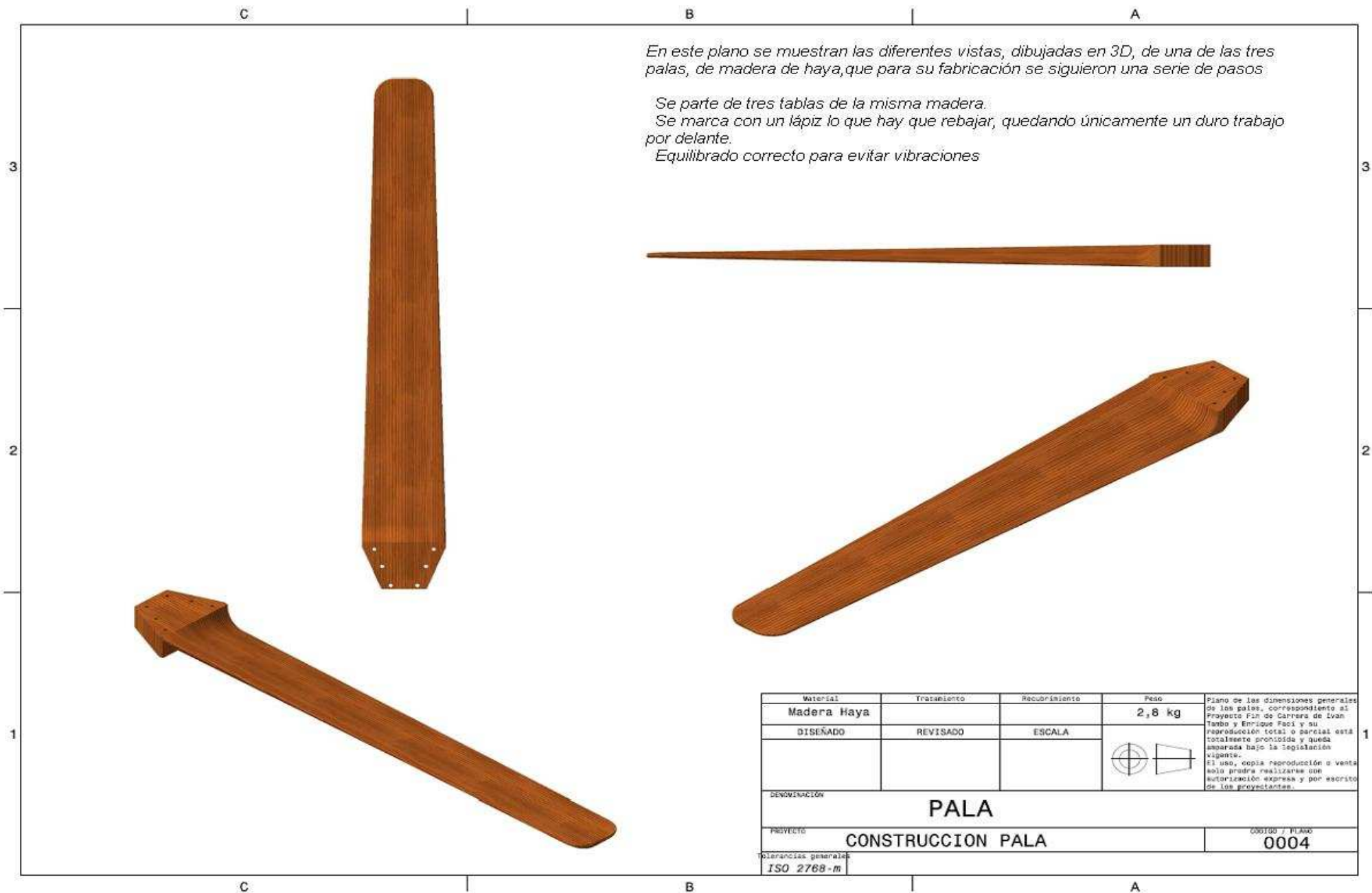


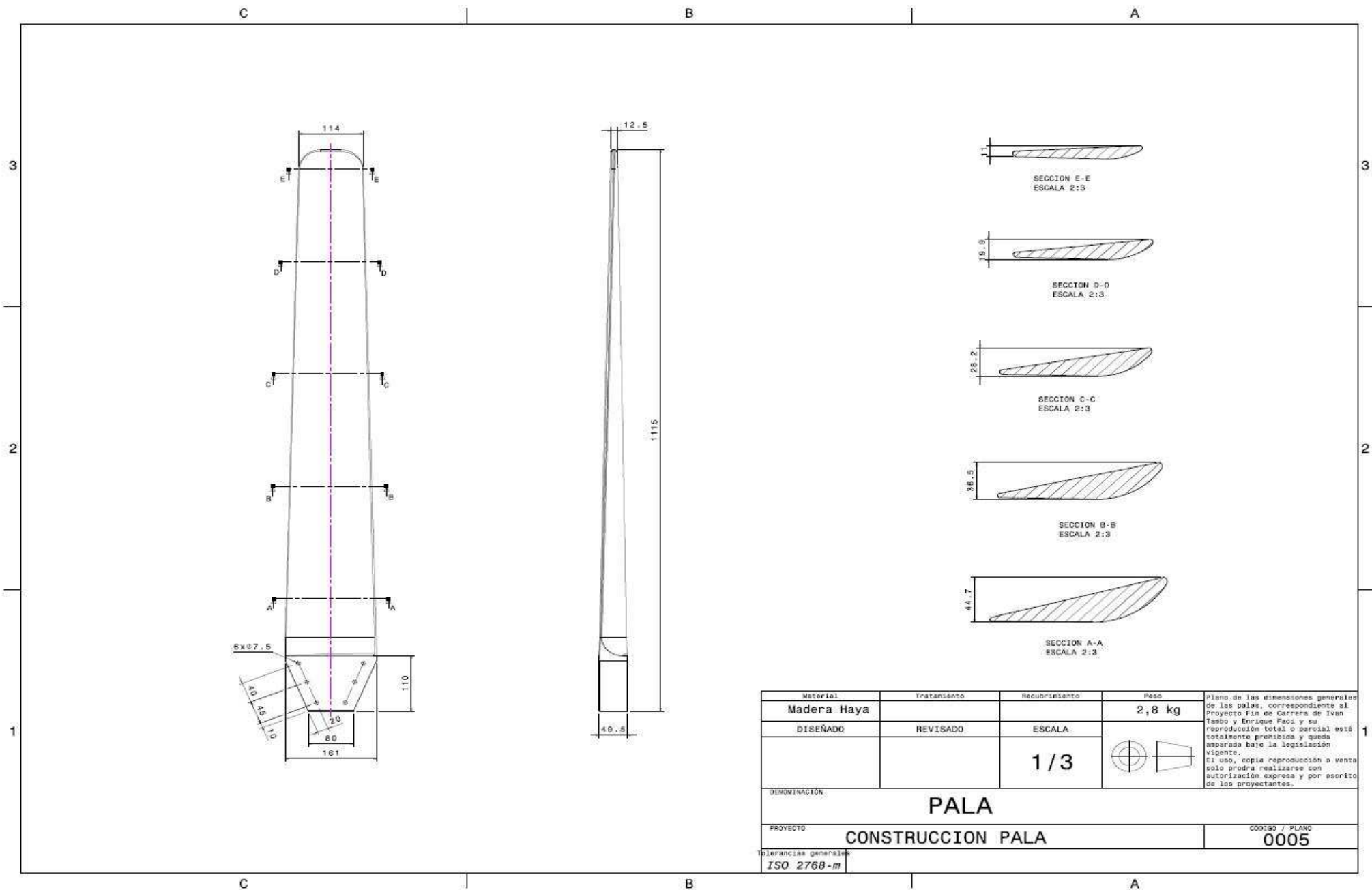
Construcción y estudio de un pequeño aerogenerador de imanes permanentes.



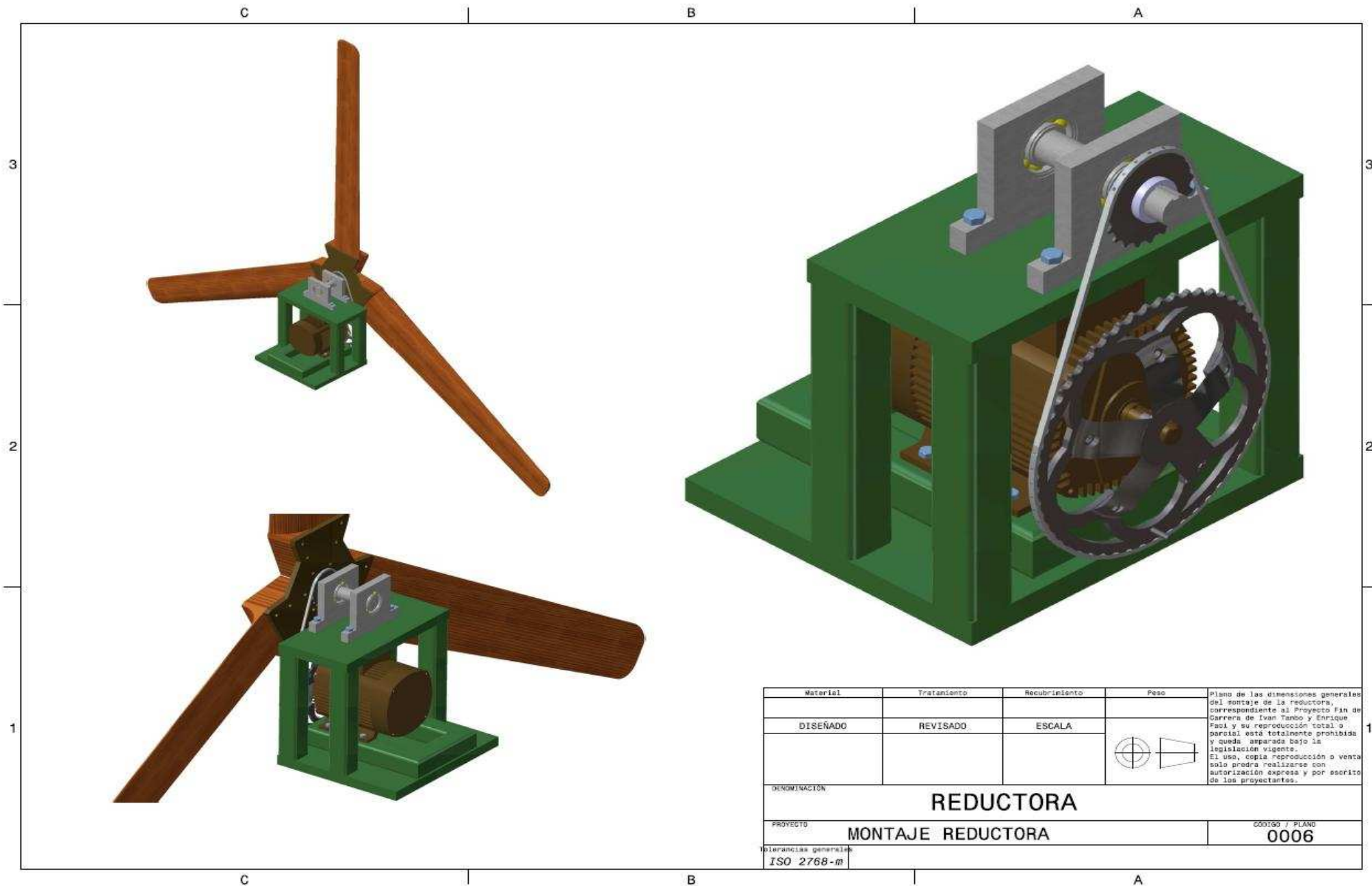


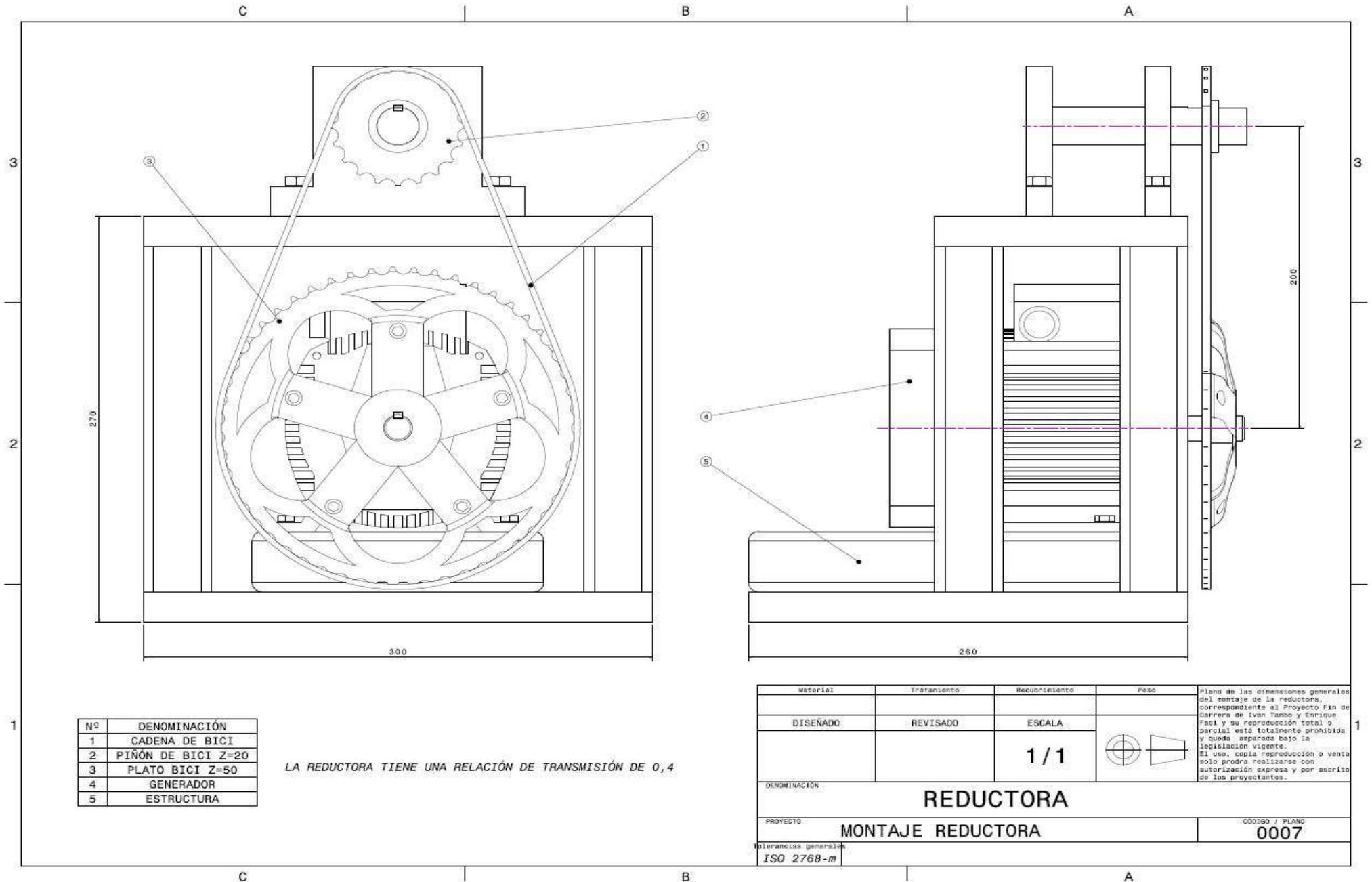
Construcción y estudio de un pequeño aerogenerador de imanes permanentes.





Construcción y estudio de un pequeño aerogenerador de imanes permanentes.







ESTUDIO Y FABRICACIÓN DE UN PEQUEÑO AEROGENERADOR

INDICE

- *1. Introducción*
- *2. Eólica y Torre*
- *3. Generador*
- *4. Instalación eléctrica*
- *5. Conclusiones y Líneas Futuras*

1. INTRODUCCIÓN.

1. *Objetivo: Construcción de un pequeño aerogenerador para el suministro eléctrico de una pequeña vivienda aislada de la red eléctrica*
2. *Reutilización en la medida de lo posible de elementos en desuso reduciendo el presupuesto*
3. *Para el generador se ha transformado un motor de jaula de ardilla en un generador síncrono de imanes permanentes*

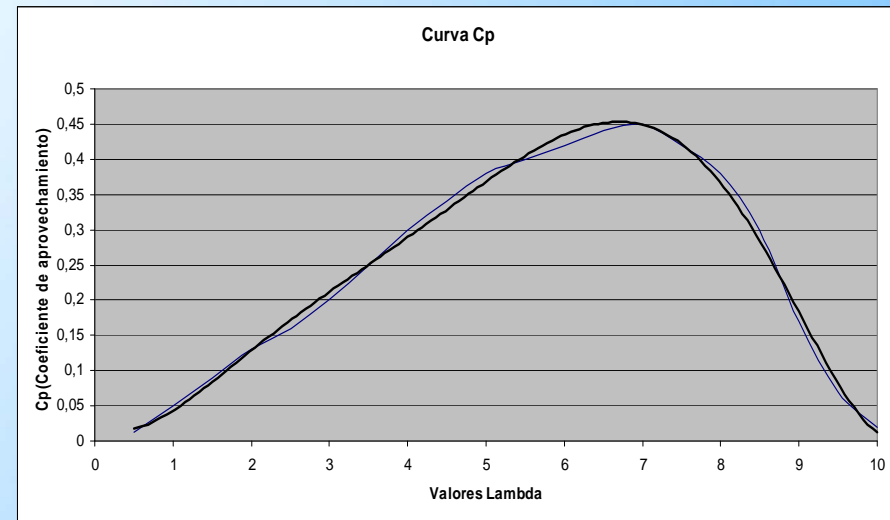
2. Eolica y Torre.

- *1. Introducción*
- *2. Eólica y Torre*
 - *Palas*
 - *Veleta*
 - *Tipos Frenado*
 - *Torre*
- *3. Generador*
- *4. Instalación eléctrica*
- *5. Conclusiones y Líneas Futuras*

PALAS

2.1 Número de palas:

- Diseño tripala:
 - Los aerogeneradores con un número par de palas sufren vibraciones.
 - Diseño tripala es el que más Cp tiene.
 - Mas fácil fabricar 3 palas que 5



$$\lambda = \frac{V_{punta_pala}}{V_{viento}}$$



2.2 Material de las palas:

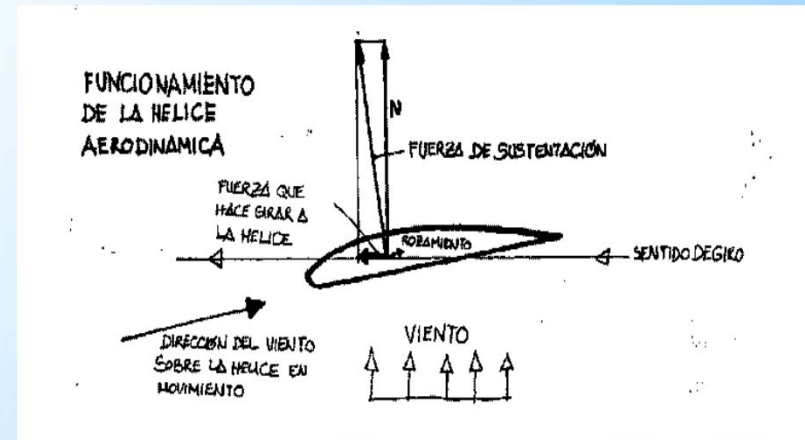
MADERA

- Su fácil aptitud al trabajar este material.
- Su bajo costo, tres listones de madera son baratos.
- La madera tiene buen comportamiento a esfuerzos de fatiga, flexión y sobretodo son ligeras.
- Un inconveniente es que requiere de mantenimiento.
- La fabricación de palas con fibra de vidrio exige un mayor costo y tiempo, ya que hay que partir de un molde previamente fabricado y calibrado.

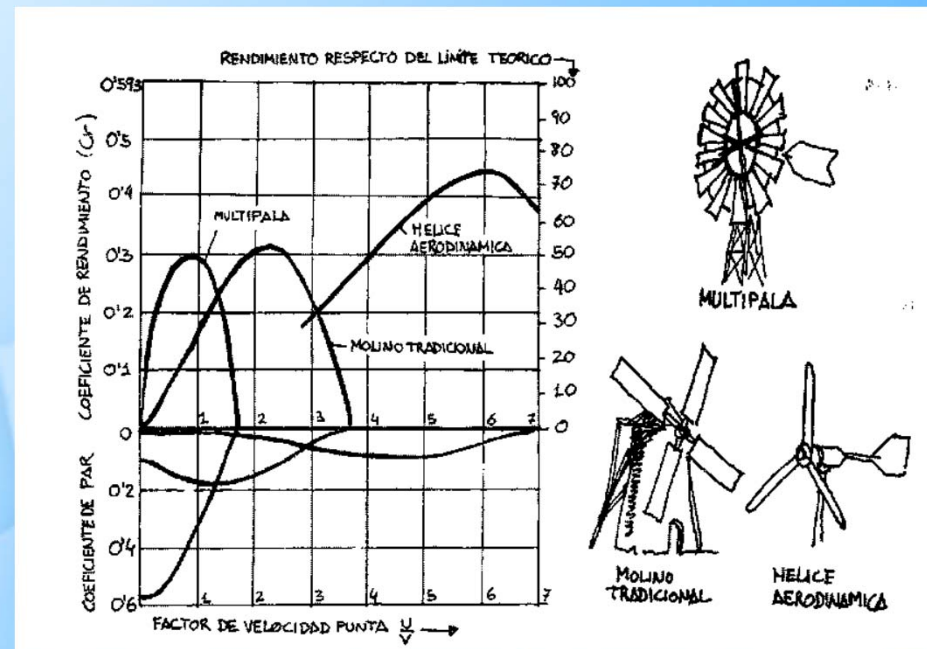


2.3 Hélice Aerodinámica:

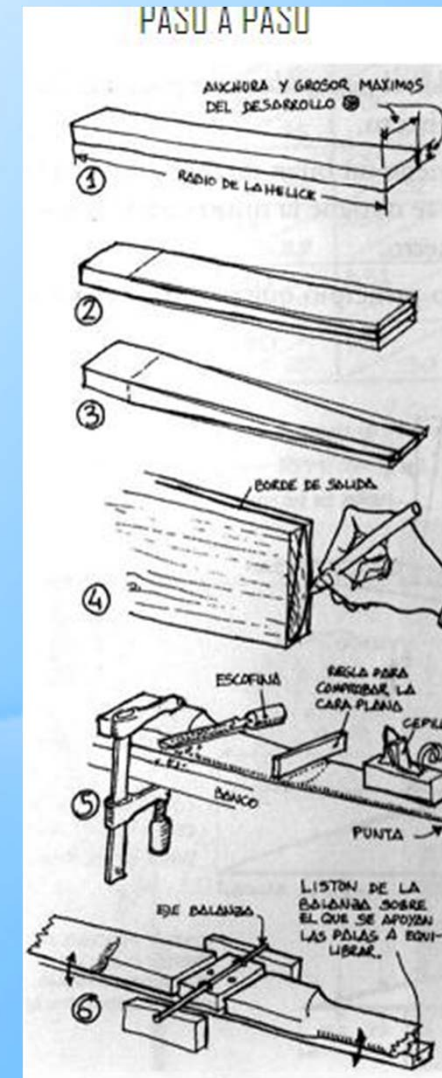
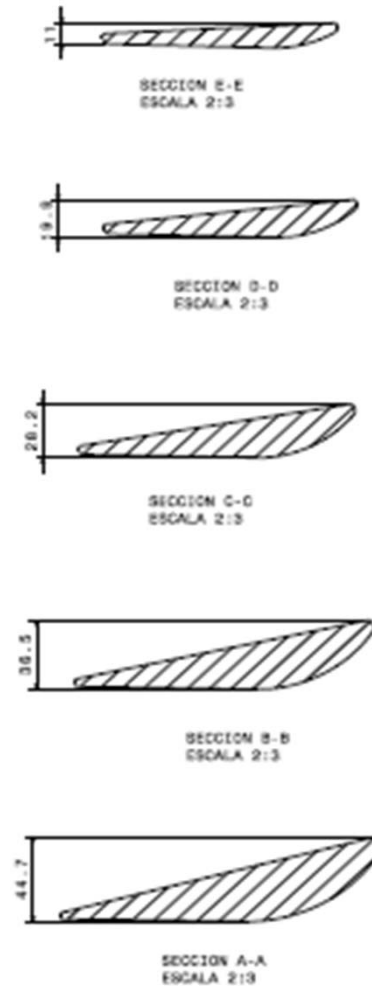
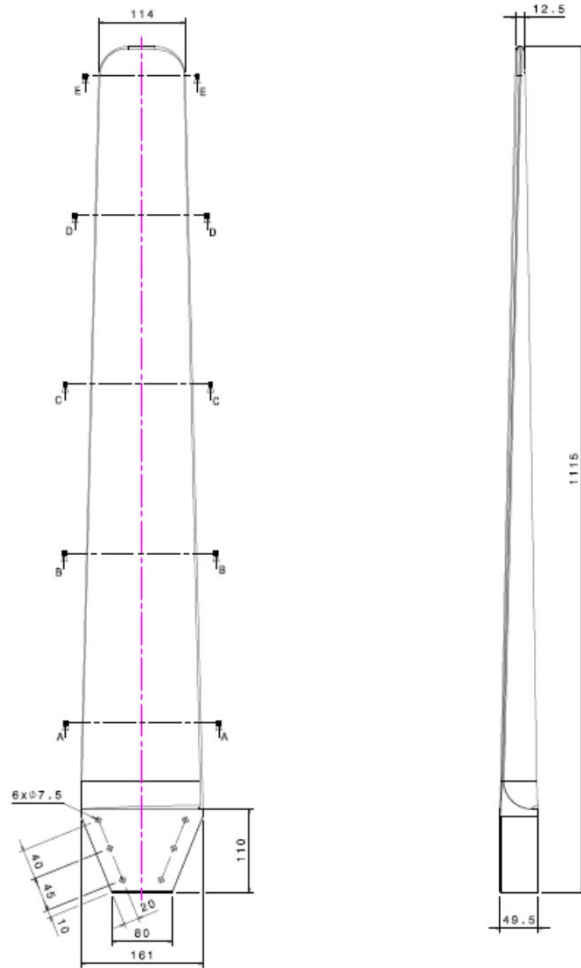
- El perfil usado es el NACA 4415.
- Alcanzan altas velocidades de giro.
- La alta velocidad de las palas influye en las vibraciones que pueden provocar si no se equilibran correctamente y rotura de las propias palas.
- Alto coeficiente de aprovechamiento de la potencia del viento.
- Poco par de arranque, pero alcanzan altas velocidades de giro.



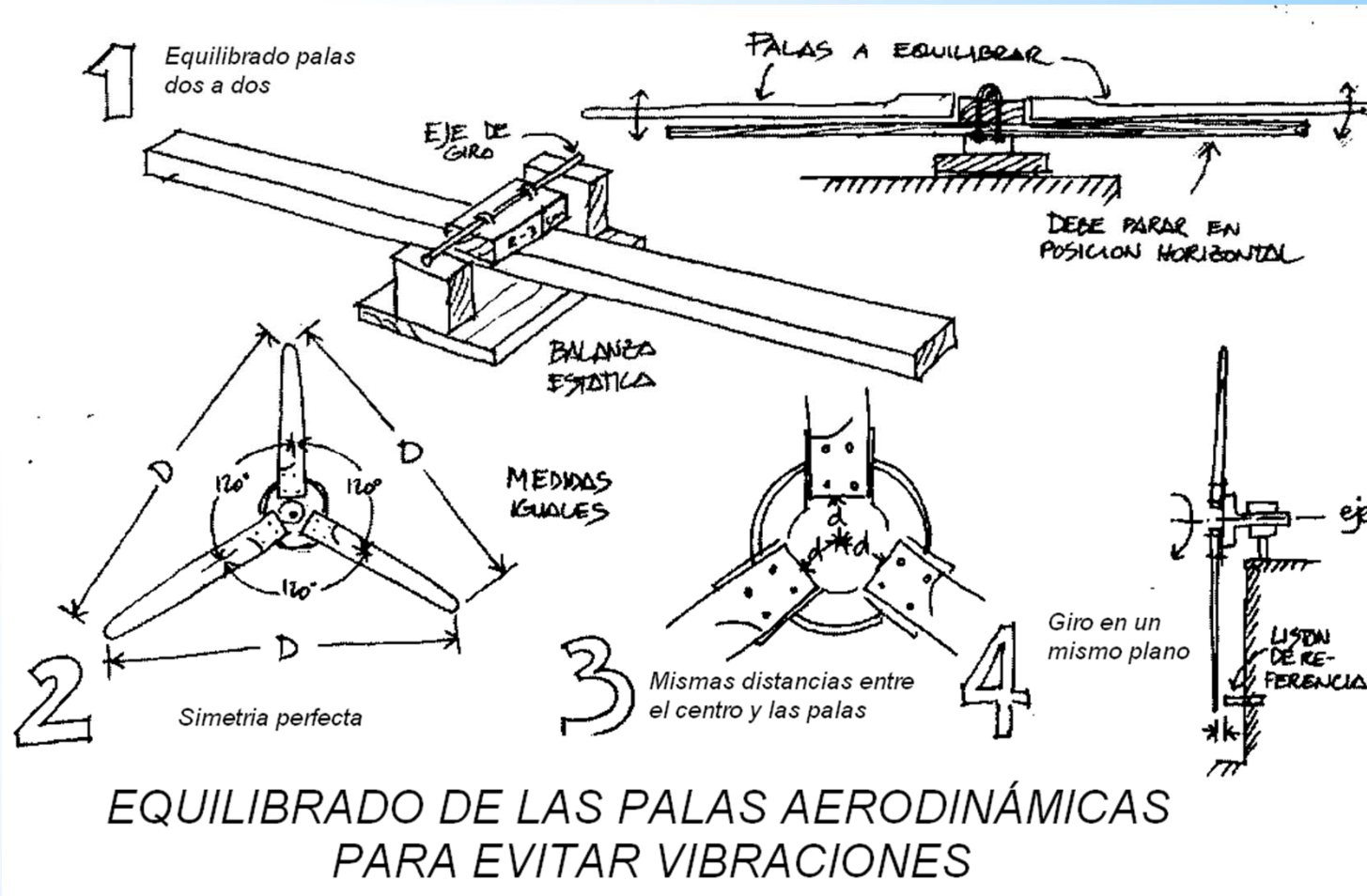
$$P_{extraida} = \frac{1}{2} C_p \cdot A \cdot V_{viento}^3 \cdot \rho_{viento}$$



2.4.2 Cómo se Construyeron:



Equilibrado



2.5 Herramientas Utilizadas:

Cepillo Electrico.



Calibre.



Escofina.



Barniz.

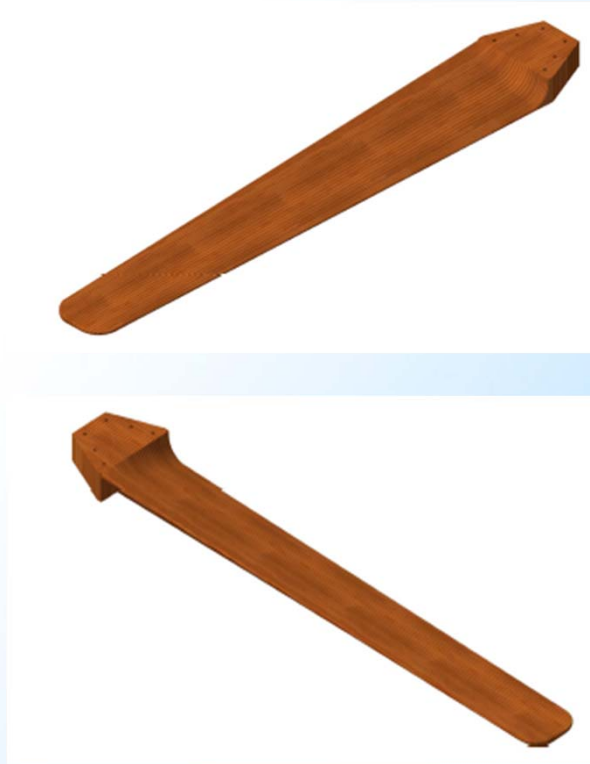


Cepillo.



2.4 Cómo se construyeron:

- *Diseño previo en programa de 3D*



Resultado final



VELETA

- Objetivo: Orientación en la dirección del viento.
- Construcción: Chapa metálica.
- Sujeta mediante una estructura al eje de pivotamiento del aerogenerador.
- Dimensiones: 55cm de largo por 34cm en su punto más alto.



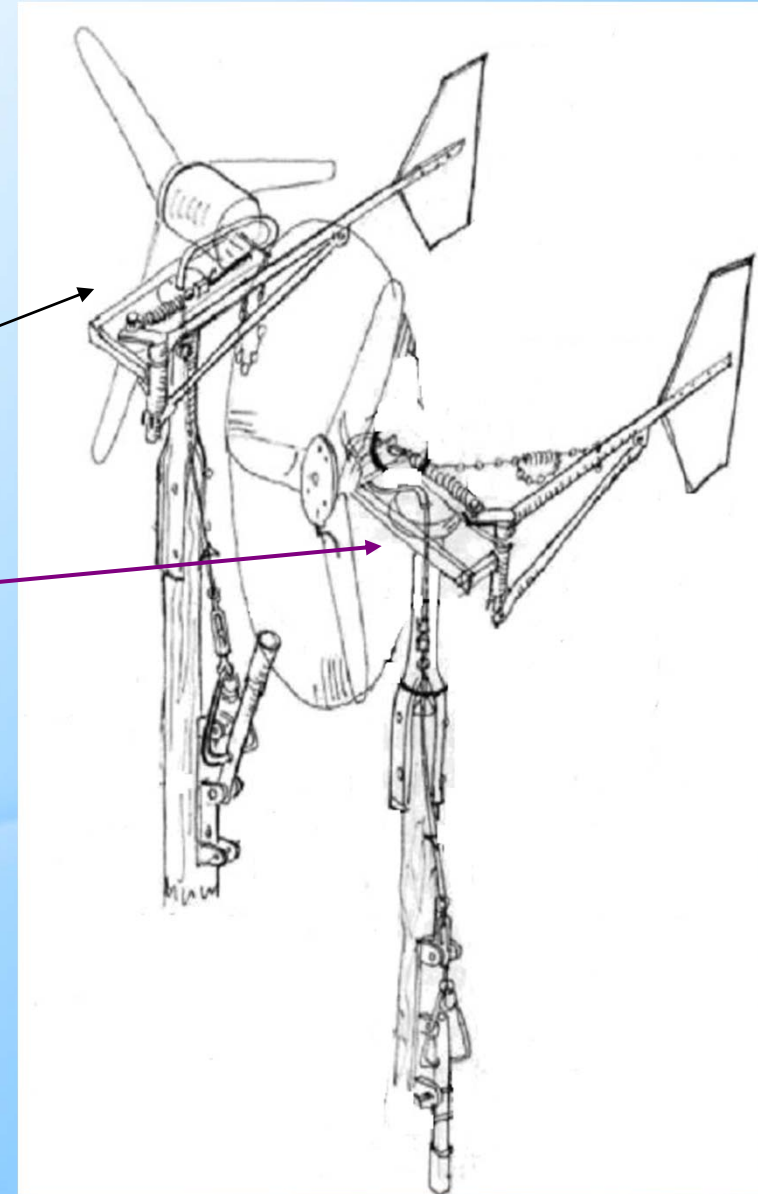
MÉTODOS DE FRENADO

- Dos tipos: Manual y Automático:

Frenado Manual:

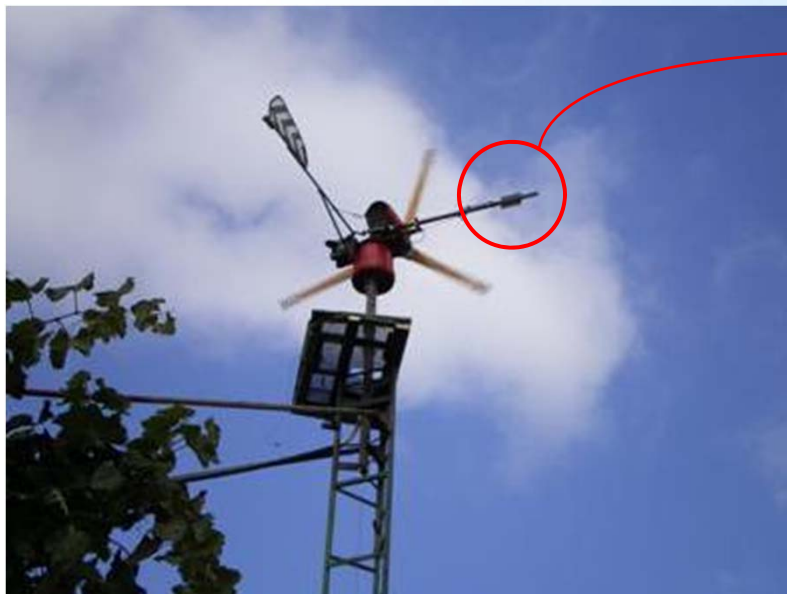
- Sistema de palanca, sirga y muelle.
- Palanca Arriba: Frenado activado. Muelle comprimido.
- Palanca Abajo: Frenado Desactivado. Muelle tensado.

Muelle de la sirga

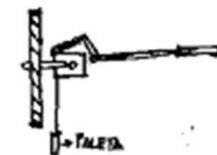
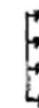


Frenado Automático:

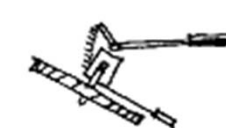
- Paleta perpendicular a la veleta.
- Tamaño: Cuarta parte de la superficie de la veleta.
- Con exceso de viento plegado del sistema tensando el muelle.



Situación con
viento normal



Situación con
viento fuerte



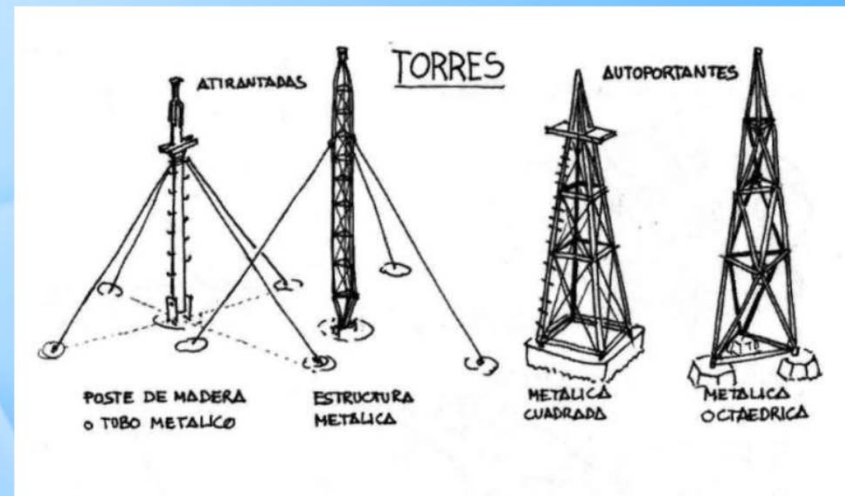
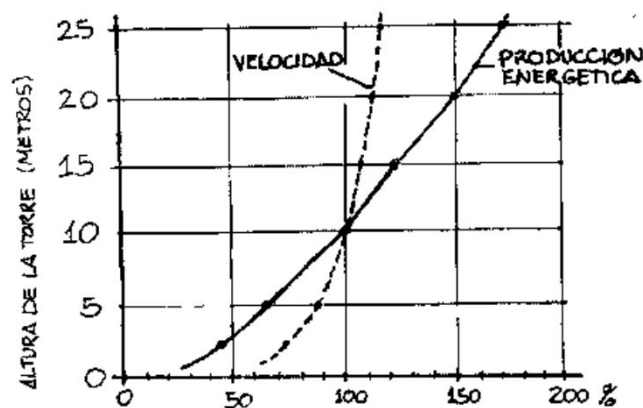
TORRE

En las instalaciones eólicas, la torre juega un papel decisivo, ya que de su altura y emplazamiento, dependerá la producción del molino.

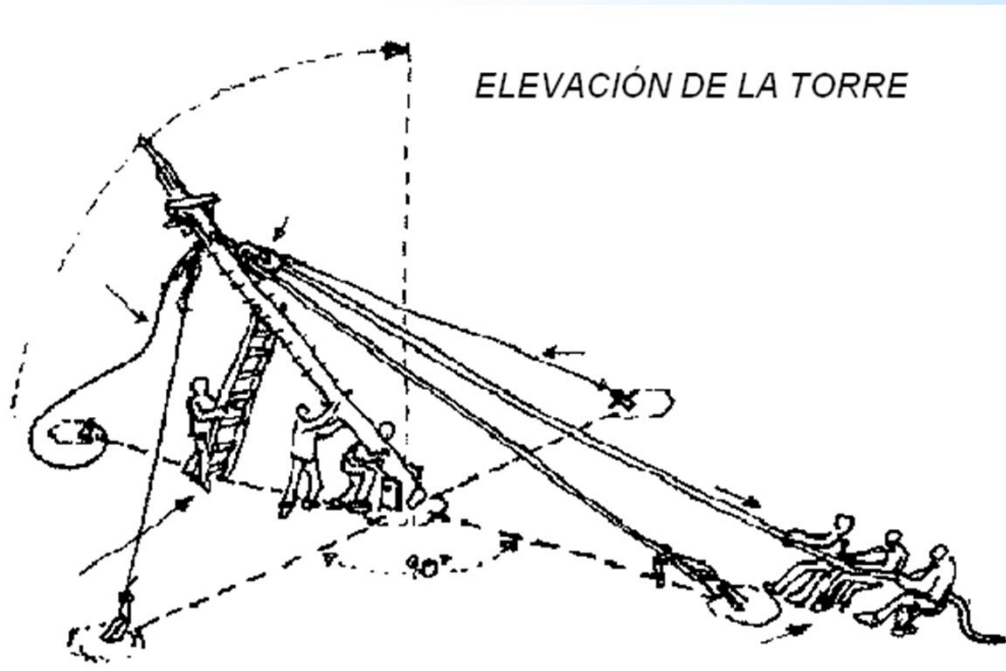
CARACTERISTICAS DE LA TORRE:

- Altura entre 10 y 15 m
- Resistente a esfuerzos de fatiga
- Baja resistencia a la fuerza del viento
- Ligera
- Una buena base en el terreno

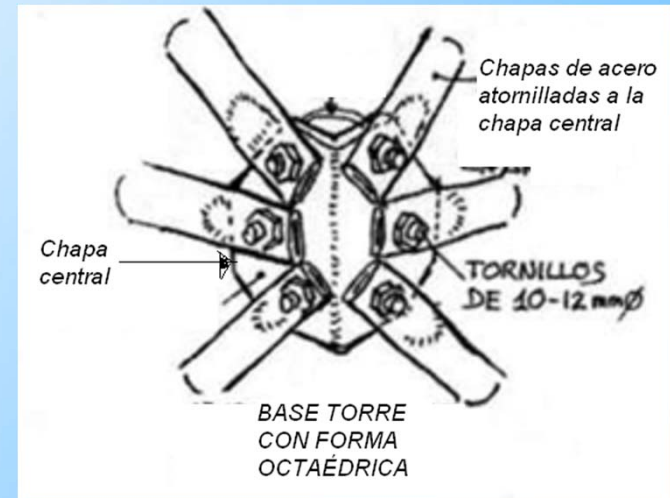
La torre que se ha utilizado es de tipo atirantada y de estructura metálica.



- ELEVACIÓN DE LA TORRE



CIMENTOS O BASE



3. *Generador.*

- *1. Introducción*
- *2. Eólica y Torre*
- *3. Generador*
 - *Imanes*
 - *Adaptación del rotor*
 - *Inserción*
 - *Cálculos*
 - *Posibilidades*
- *4. Instalación eléctrica*
- *5. Conclusiones y Líneas Futuras*

IMANES

- Imanes de Neodimio N42.

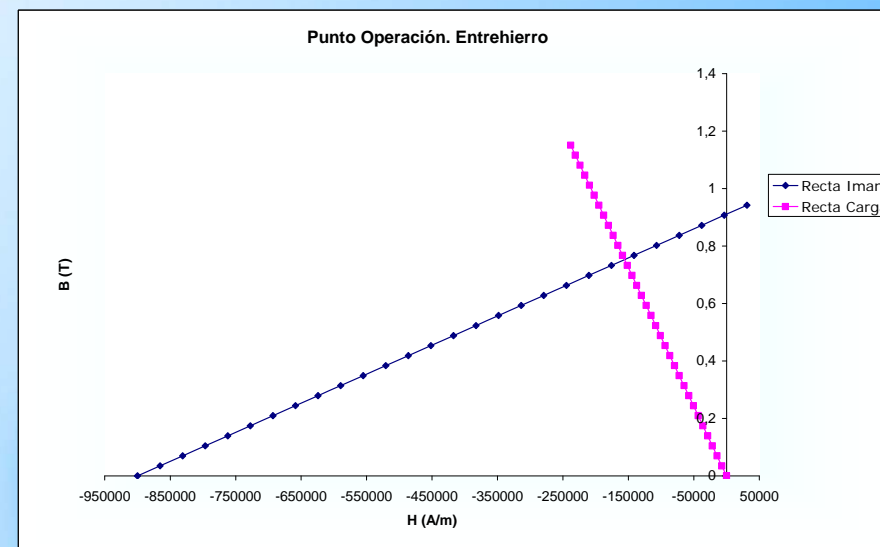
$$B_g = \frac{B_r}{\left(\frac{g \cdot B_r}{H_c \cdot \mu_0 \cdot l_m} + \frac{S_g}{S_m} \right)} = 0,7543 T$$



$$B_r = 1.3 T$$

$$H_c = 910 \text{ KA/m}$$

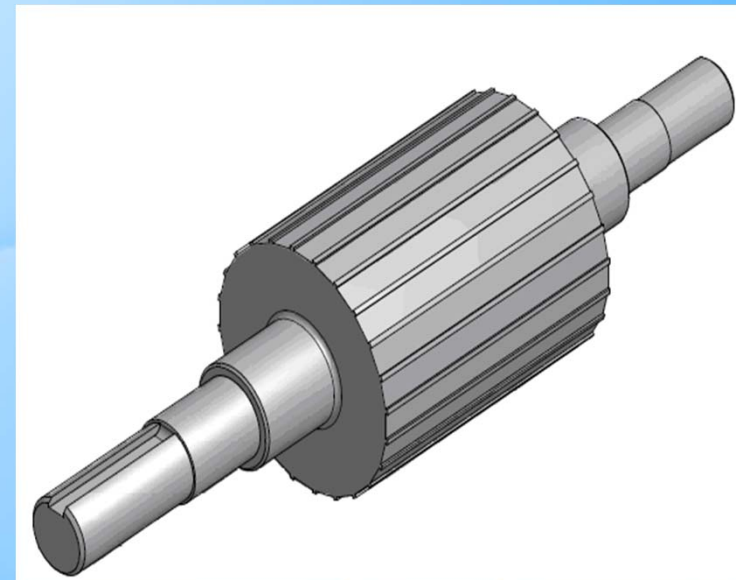
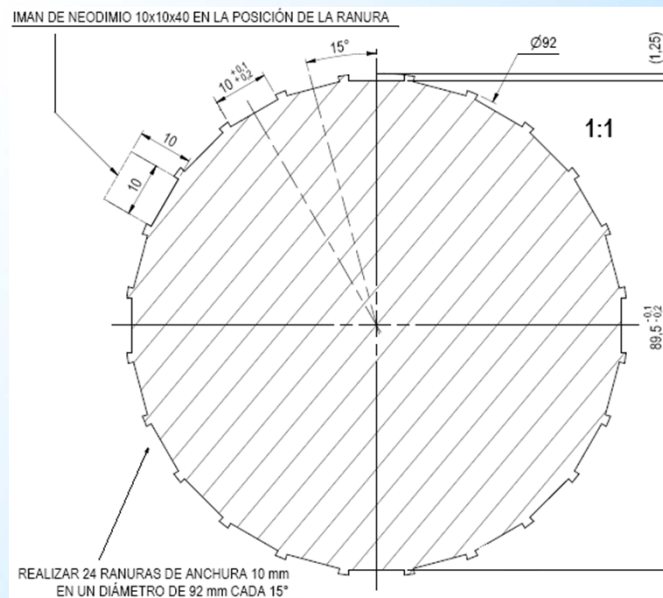
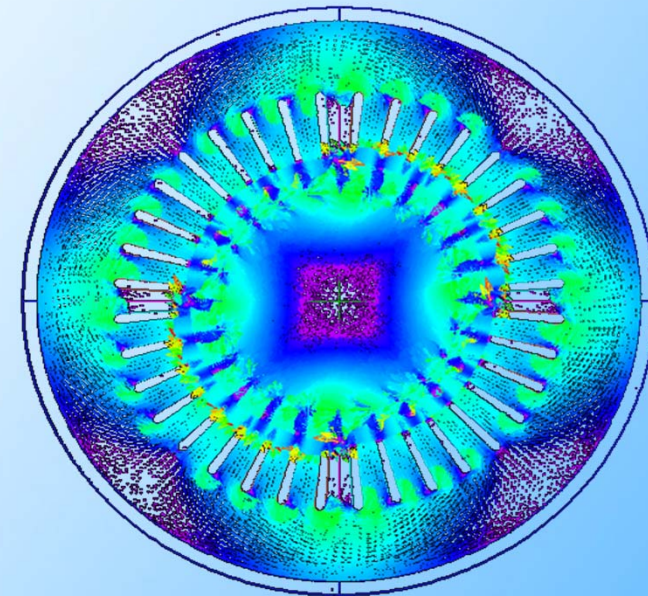
$$B_{\text{saturación estator}} = 1.5 T$$



Diseño

Adaptación del Rotor

- Rebajar rotor para alojar imanes.
- Fresado para crear “canales” donde alojar los imanes alineados.
- Construcción de anillos no ferromagnéticos para fijación y ayuda en el montaje.



Construcción

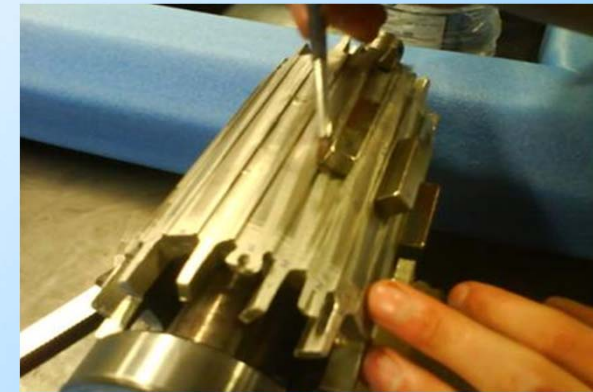
- *Partimos de un motor asíncrono de jaula de ardilla de 2 pares de polos.*
- *Extracción del rotor.*



Adaptación del Rotor

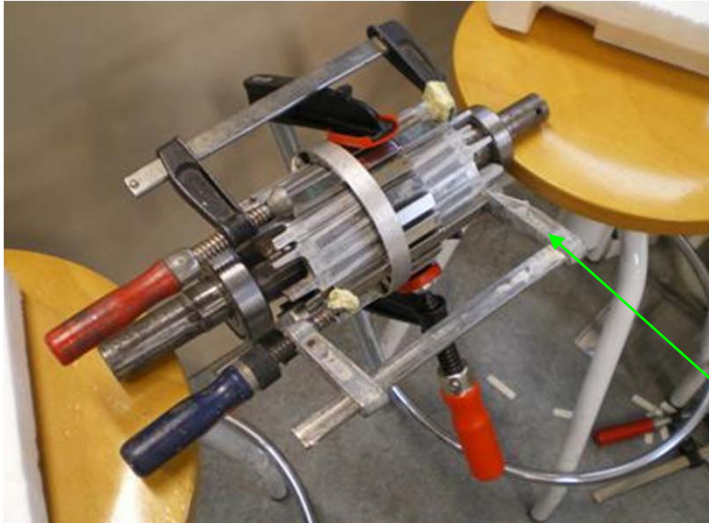
Colocación Imanes 1

- *Colocación de la fila central de imanes con pegamento.*
- *Colocación alterna para evitar fuerzas de repulsión entre imanes.*
- *Completar la fila de imanes con la ayuda de los anillos para su fijación correcta.*

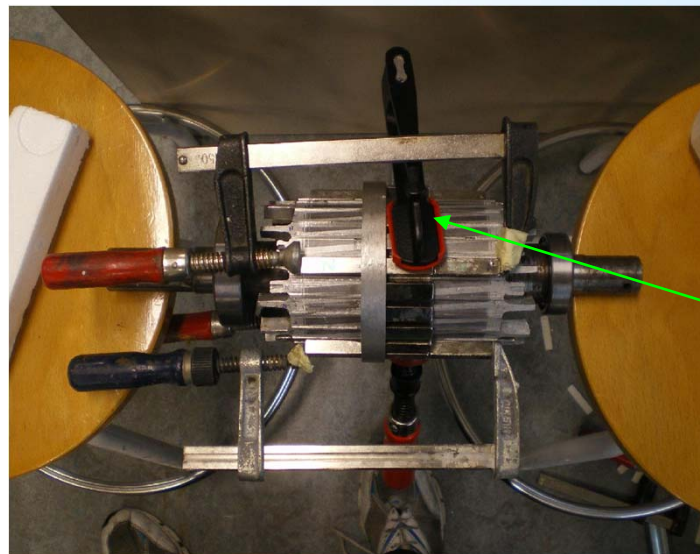


Adaptación del Rotor

Colocación Imanes 2



- *Colocación de las dos filas exteriores de imanes fijándolos con pegamento.*



- *Sargentos longitudinales para evitar fuerzas de repulsión entre imanes durante el secado del pegamento.*
- *Sargentos transversales para fijar en su posición a imanes que se levanten del rotor radialmente.*

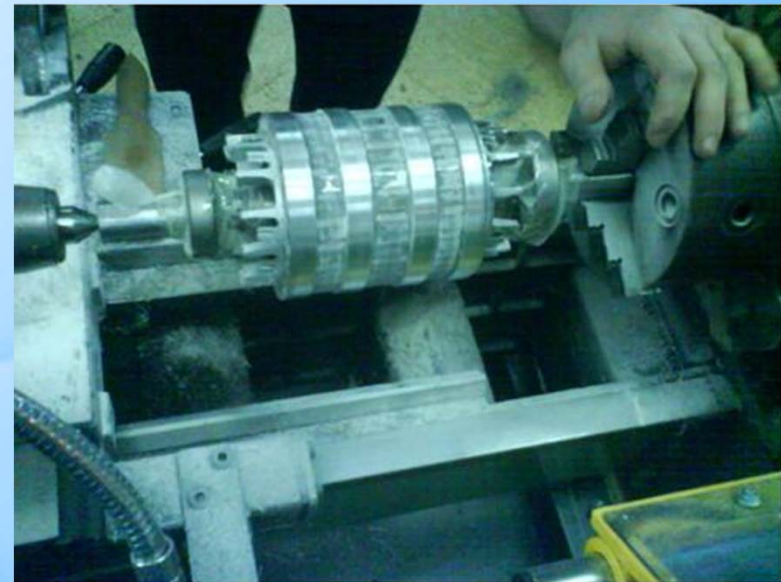
Adaptación del Rotor

- *Finalizada la colocación de imanes, se procede a la fijación de los anillos en su lugar definitivo.*
- *Aplicación de masilla para el relleno de los huecos entre imanes.*



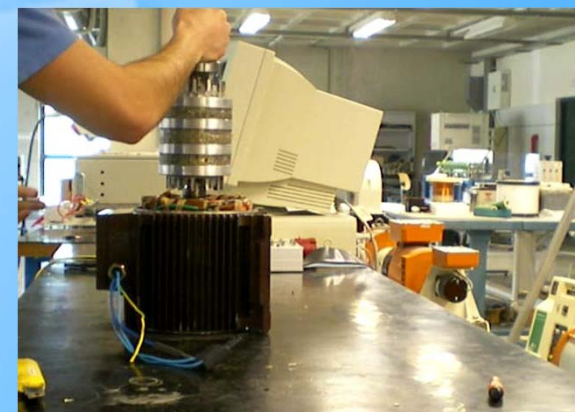
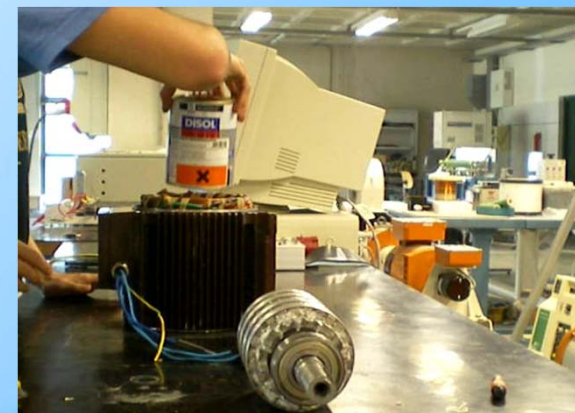
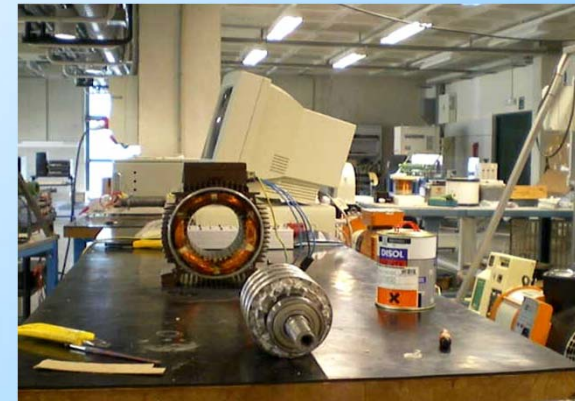
Adaptación del Rotor

- *Nuevo torneado del rotor para reducir el diámetro final y evitar el roce con el estator.*

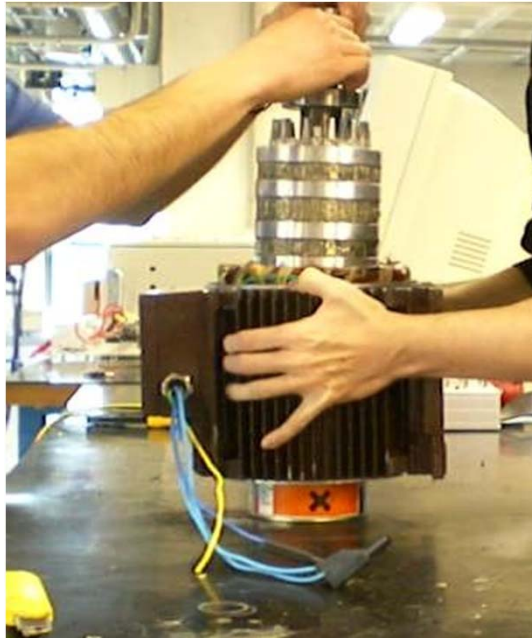


Inserción en el estator 1

- *Colocación vertical del estator.*
- *Colocación de una lata dentro del estator*
- *Colocación del eje del Rotor sobre la lata*

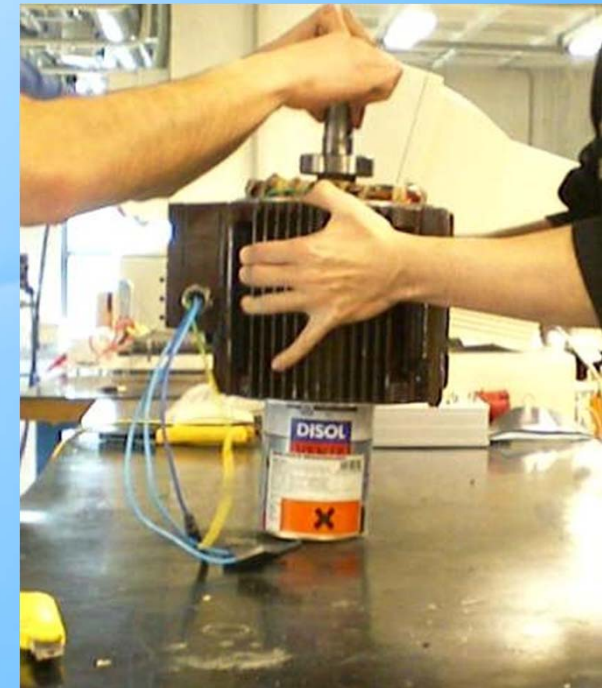


Inserción en el estator 2



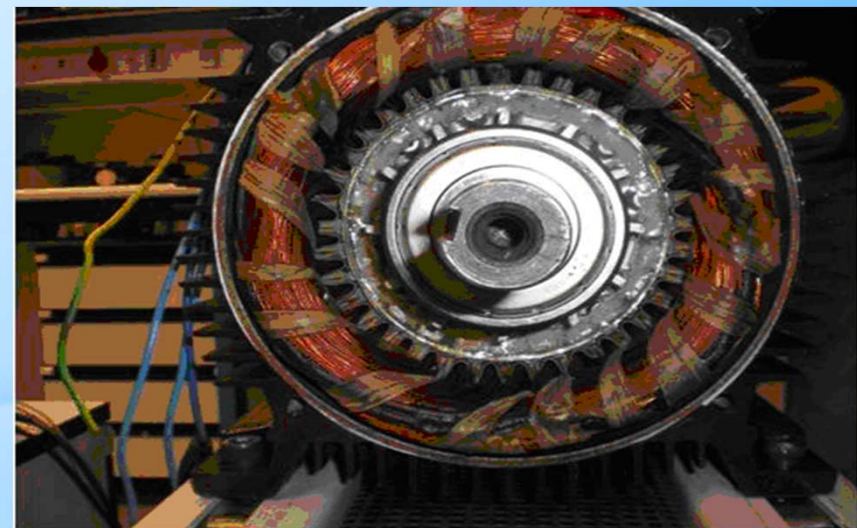
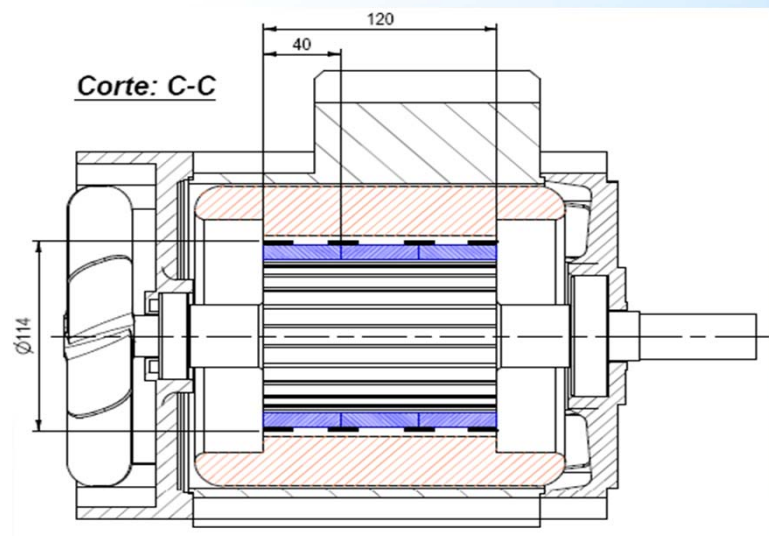
- *Elevación del Estator lentamente.*

- *Alineación del Estator sobre el Rotor.*



Resultado Final.

Una vez finalizado el proceso se observa el resultado dibujado en un corte transversal y en una fotografía frontal.



Cálculos

Para los cálculos se utilizaron tres vías diferentes:

•Teóricos

- Para los resultados teóricos se utilizaron las fórmulas correspondientes para obtener las primeras conclusiones.

•Prácticos

- Los resultados prácticos se obtuvieron con el generador sobre un banco de pruebas.

•JMAG

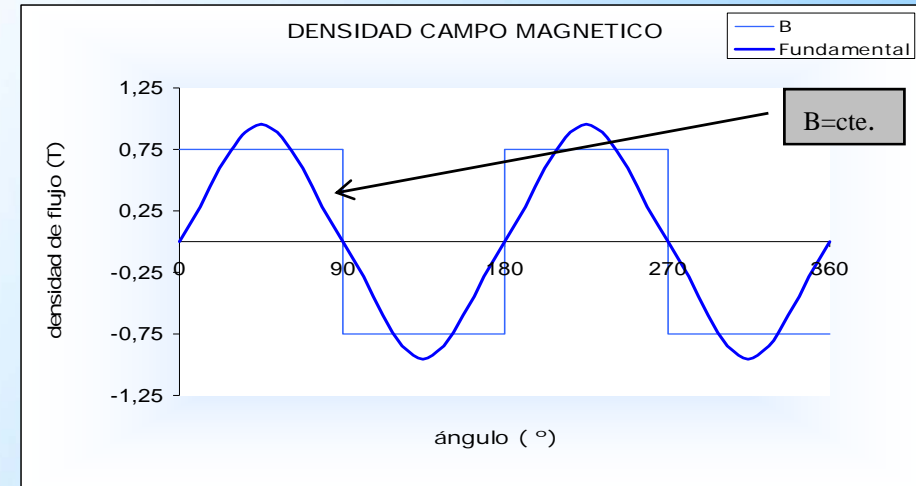
- JMAG es un programa de simulación de máquinas cuyo funcionamiento se basa en leyes de electromagnetismo.

Distribución Campo Magnético

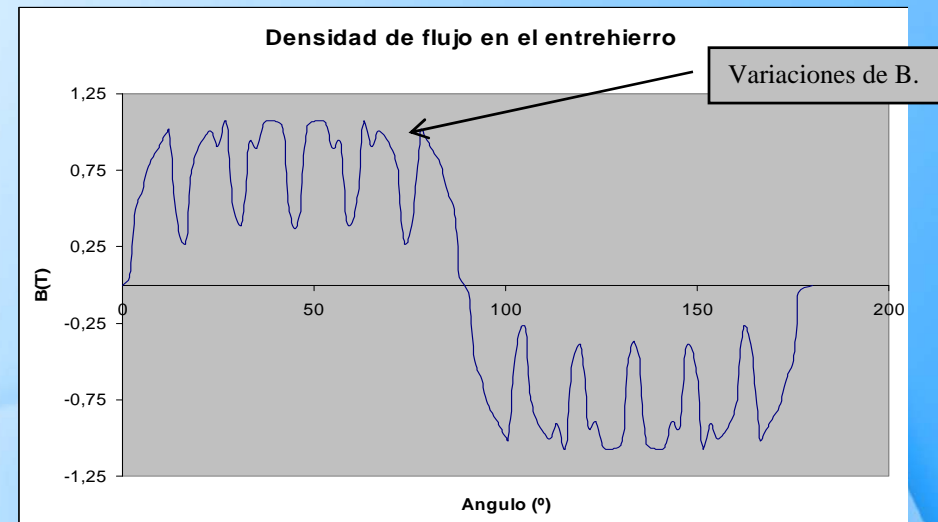
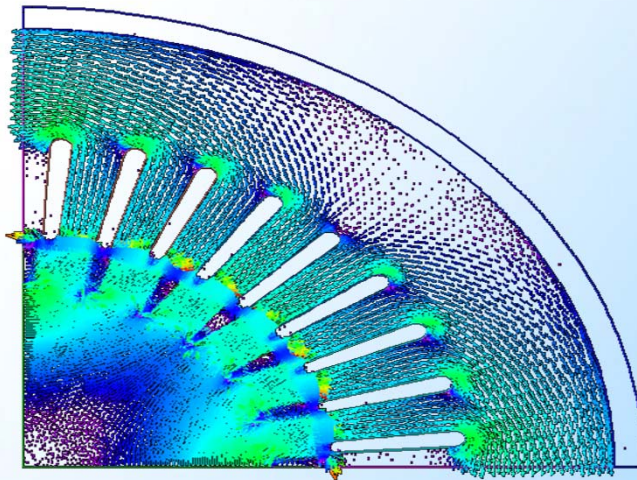
Teórico

$$B_g = \frac{B_r}{\left(\frac{g \cdot B_r}{H_c \cdot \mu_0 \cdot l_m} + \frac{S_g}{S_m} \right)} = 0,7543 \text{ T}$$

- Fundamental** $B_{1\max} = \frac{4}{\pi} \cdot B_{sal} \cdot k_{d1} = 0.9218 \text{ T}$



JMAG



La diferencia se observa en que JMAG no desprecia el efecto de las ranuras ni de que los imanes formen un polígono, por lo tanto, tal el flujo magnético no es constante.

Tensión Inducida.

Teórico

- La tensión inducida en cada uno de las espiras de los devanados, se calcula aplicando la ley de Faraday.

$$e_{esp} = -\frac{d\phi}{dt} = B \cdot l \cdot r \cdot 2\omega = 0.7543 \cdot \frac{120}{1000} \cdot \frac{54,75}{1000} \cdot 2 \cdot 157,07 = 1,5V$$

$$e_{sal} = N \cdot e_{b1} + N \cdot e_{b2} + N \cdot e_{b3} = 76 + 76 + 76 = 228 V$$

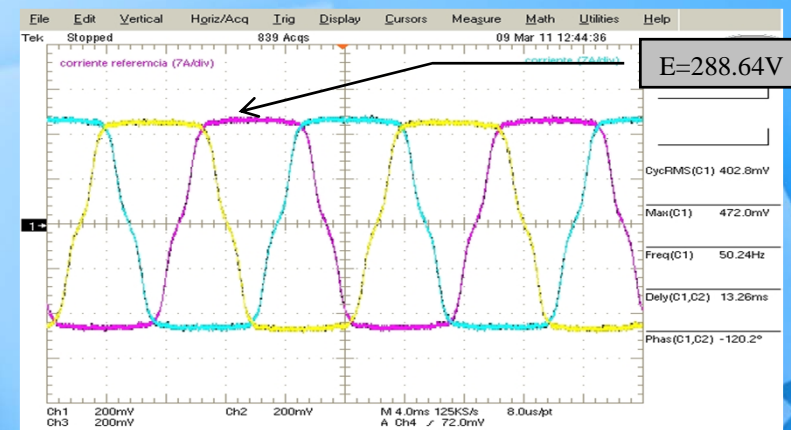
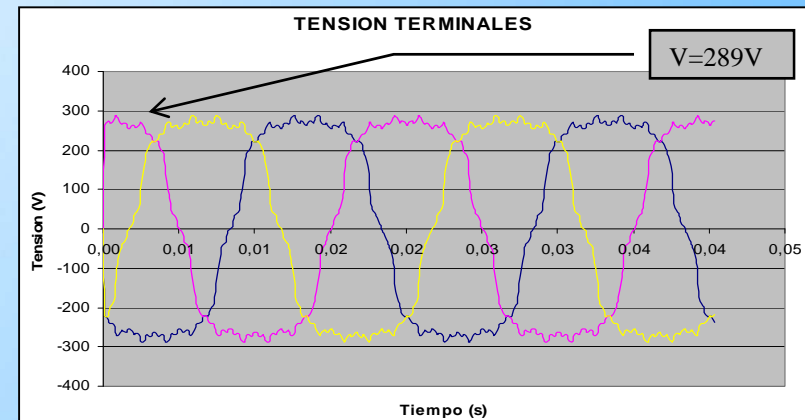
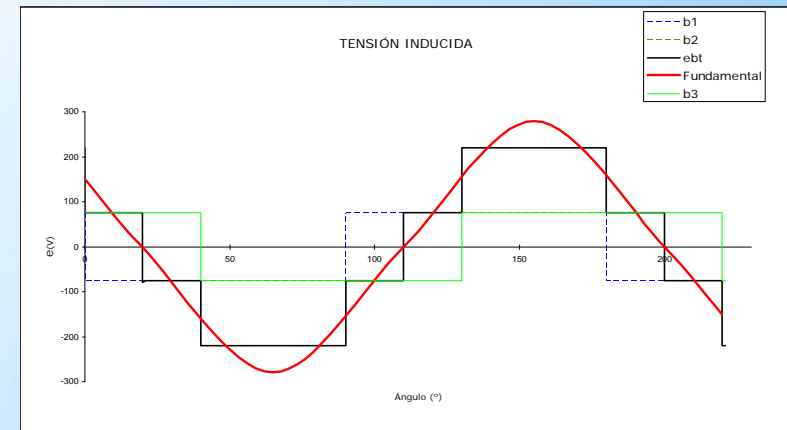
JMAG

- Tensión en JMAG afectada por las formas del diseño de las ranuras y valor 289 V de valor máximo. 203 V de valor eficaz.

$$e(t) = E_{1\max} \cdot \sin(\Omega t) + E_{3\max} \cdot \sin(3\Omega t) + E_{5\max} \cdot \sin(5\Omega t) \dots$$

Práctico

- El valor del voltaje con el osciloscopio es de 204,1 V eficaces.



CÁLCULOS TEÓRICOS EN CARGA.

Teórico.

- Se ha conectado en bornes del estator una carga trifásica equilibrada conectada en estrella puramente resistiva.
- Carga resistiva equilibrada: $R_R = R_S = R_T = 110\Omega$

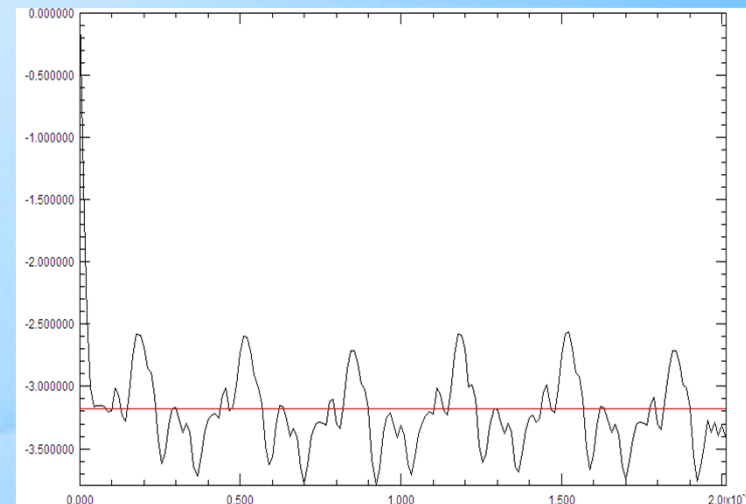
$$I_A = \frac{V}{R} = \frac{203}{110} = 1,83A$$

$$T = -\frac{p \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot R \cdot l}{g} \cdot F_A \cdot F_a \cdot \sin(p\theta_m) = -\frac{8 \cdot R \cdot l \cdot B \cdot N_{seq}}{\pi} \cdot i_A \cdot \sin(p\theta_m) = -3.4 N \cdot m$$

JMAG.

El valor medio que presenta el par es:

$$T = -3.18 N \cdot m$$



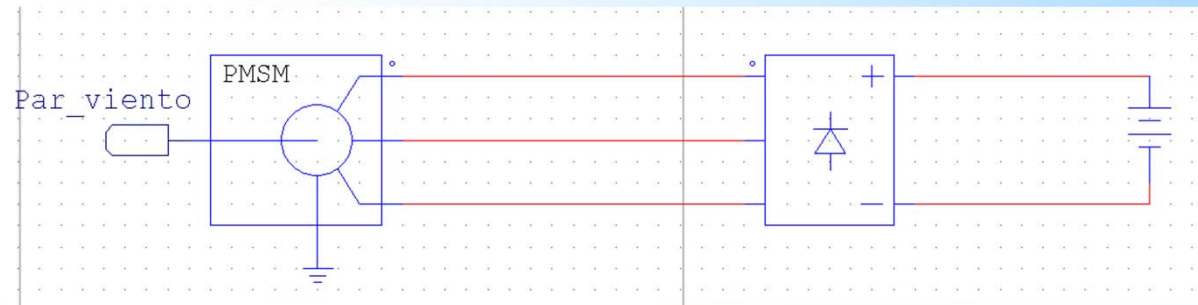
Práctico.

$$P_{generada} = \sqrt{3} \cdot V_{fase} \cdot I_{fase} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 202.07 \cdot 1.83 \cdot 0.83 = 531 W$$

$$T = \frac{P_{generada}}{\Omega} = \frac{-531}{157.07} = -3.38 Nm$$

Sistema.

Sistema original: rectificador Trifásico.



Consiste en colocar un rectificador trifásico entre el generador y las baterías.

Problema: Con una batería de 12 V el generador gira muy despacio

Soluciones.

- Transformador.

Consiste en colocar un transformador trifásico entre el generador y las baterías.

Soluciones II.

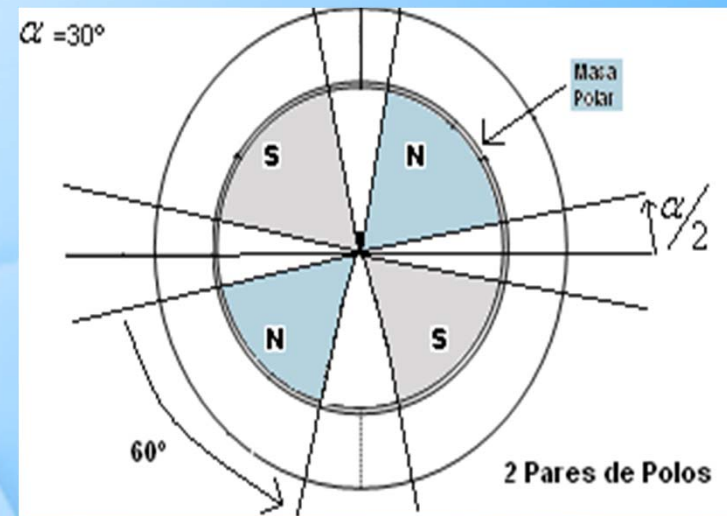
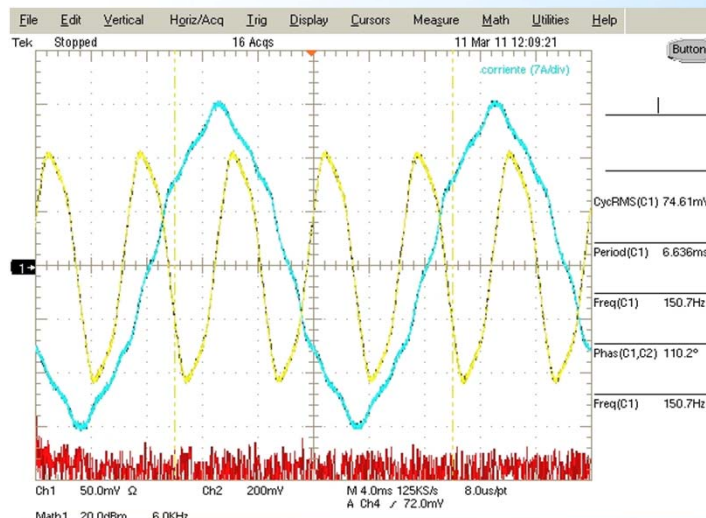
• Conexión en triángulo.

Con el mismo bobinado se reduce el voltaje de línea.

En triángulo se observa un tercer armónico de gran valor.

Para anular el tercer armónico se debería realizar la técnica de paso acortado en el rotor.

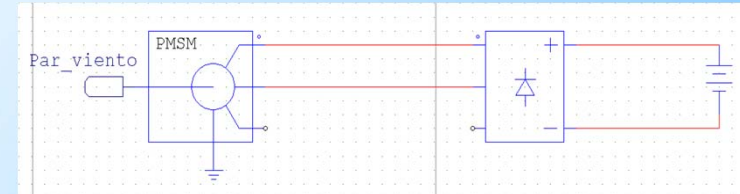
$$k_{pn} = \cos\left(\frac{n\alpha}{2}\right) \left\{ \begin{array}{l} n=3 \\ \alpha=60 \end{array} \right. \rightarrow k_{pn} = \cos(90) = 0$$



Soluciones III.

- **Fase al Aire.**

Dejar una fase sin conexión reduciendo así el voltaje en bornes del rectificador.



- **Rectificadores Monofásicos.**

Consiste en colocar tres rectificadores monofásicos entre el generador y las baterías.

- **Asociación de Baterías.**

Asociar baterías en serie aumentando el voltaje.

- **Imanes menos potentes.**

Construcción del rotor con imanes menos potentes que los actuales. Ésta solución solo es posible antes de la construcción.

- **Puente Tiristores.**

Colocación de un puente de tiristores para regular el voltaje en las baterías. Requiere control del ángulo de disparo.

Solucion Adoptada.

REDUCTORA

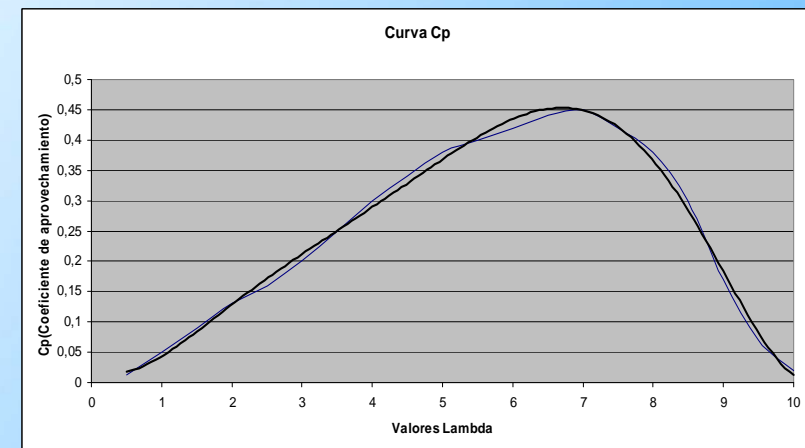
- Elemento mecánico situado entre las palas y el generador.

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R_{pala} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}}{V_{viento}}$$

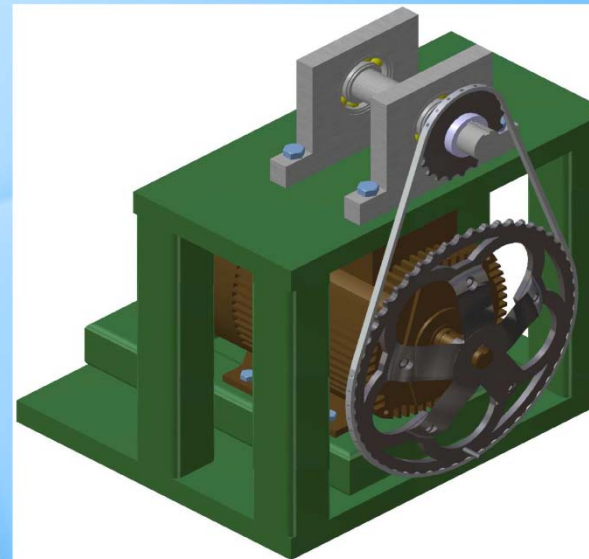
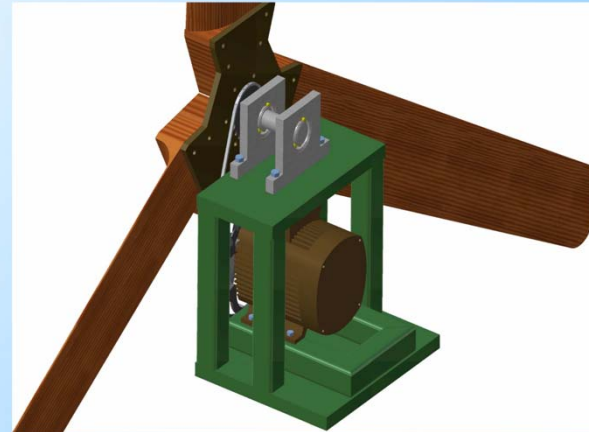
$$\Omega = \frac{\lambda \cdot V_{viento}}{R_{pala} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}} = \frac{7 \cdot 6}{1.5 \cdot \frac{2 \pi}{60}} = 267 \text{ rpm}$$

- Con el PSIM se obtuvo la relación de la reductora

$$rpm_conducida = rpm_conductora \cdot i = 267 \cdot 0.39 = 104_rpm$$



Fotos reductora



EFECTOS REDUCTORA

Rectificador Trifásico	Vv	Lambda	Cp	Pextr	Idc	Irms	Vrotor
12V	4	2,12	0,137	38,7	2,3	1,83	53,9
	6	1,92	0,12	118,2	5,25	4,07	73,5
	8	2,01	0,131	296	9,68	7,35	102,78

Reductora 0,40	Vv	Lambda	Cp	Pextr	Idc	Irms	Vrotor
12V	4	5,11	0,38	108,6	5,05	3,93	71,7
	6	5,4	0,396	377,7	11,37	8,58	113,6
	8	6,3	0,43	975	20	14,9	176,2

4. Instalación.

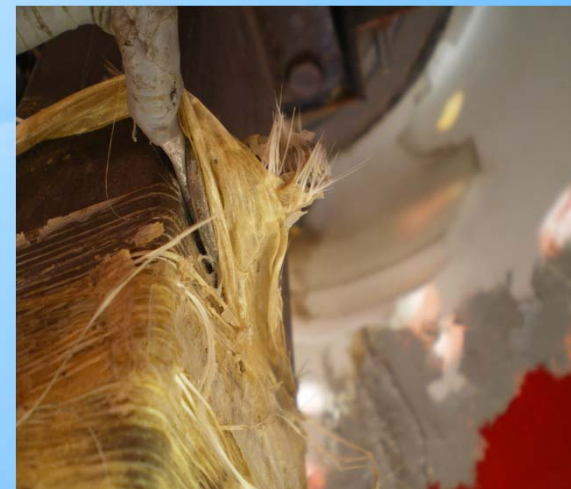
- *1. Introducción*
- *2. Eólica y Torre*
- *3. Generador*
- *4. Instalación eléctrica*
 - *Conversión y transporte.*
 - *Vivienda.*
 - *Baterías.*
- *5. Conclusiones y Líneas Futuras*

INSTALACIÓN ELÉCTRICA

- *En el aerogenerador.*
 - *Conversión AC-DC.*
 - *Bajada potencia aerogenerador-baterías.*
- *En la vivienda.*
 - *Entrada potencia de aerogenerador.*
 - *Almacenamiento energía.*
 - *Conversión DC-AC.*

Conversión y transporte

- *CONVERSIÓN AC-DC.*
 - Se requiere de un rectificador trifásico, el cual estará refrigerado por un radiador.
- *BAJADA DE POTENCIA*
 - Escobillas + anillos rozantes:
 - Para minimizar el número de escobillas se opta por bajar la tensión continua
 - Dos terminales:
 - Terminal positivo conectado a un anillo rozante
 - Terminal negativo conectado al mastil



VIVIENDA

- *Cuadro de control*
 - Sirve para controlar qué cantidad de energía está entrando de las placas y aerogenerador además de proteger la instalación y baterías.
- *Almacenamiento de energía*
 - Para llevar a cabo la acumulación de energía se dispone de un conjunto de baterías conectadas en paralelo.



VIVIENDA

- *Conversión DC-AC.*
 - El inversor es el encargado de adaptar la energía acumulada en las baterías en una energía alterna monofásica 50 Hz 230 V, para su consumo.



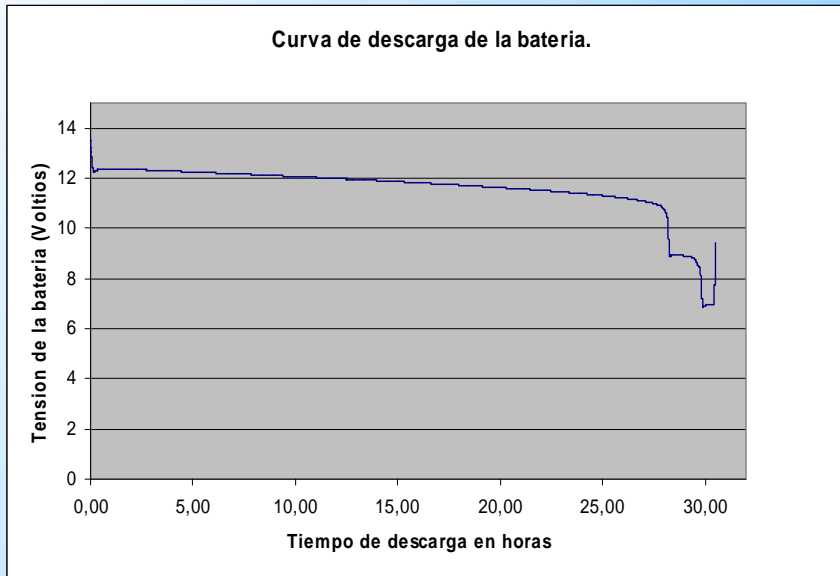
BATERIAS

- Se dispone de 3 baterías de camión de 106 Ah cada una.
- Son de plomo-ácido.
- Se realizaron los ensayos de carga y descarga para comprobar el estado de las baterías.

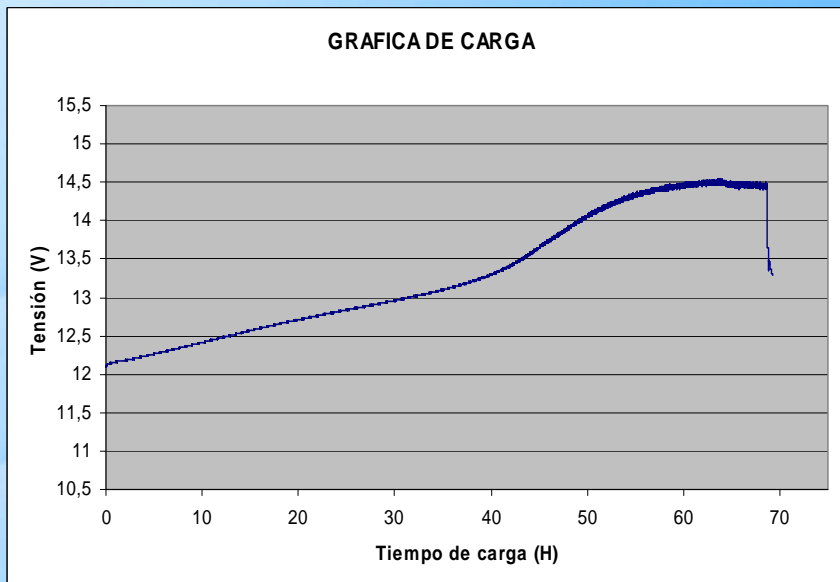


Ensayos de la Batería.

Ensayo de descarga.



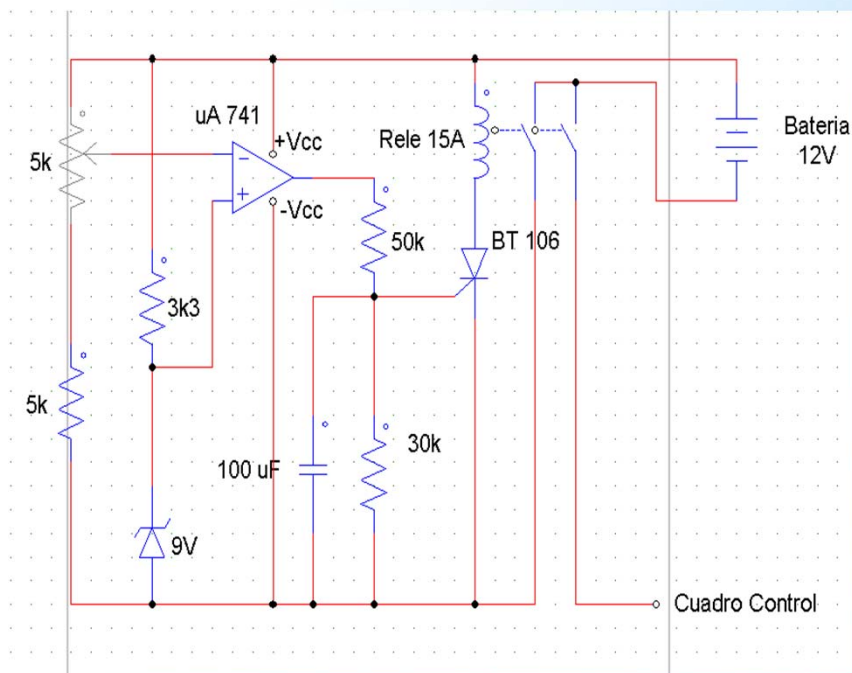
Ensayo de Carga.



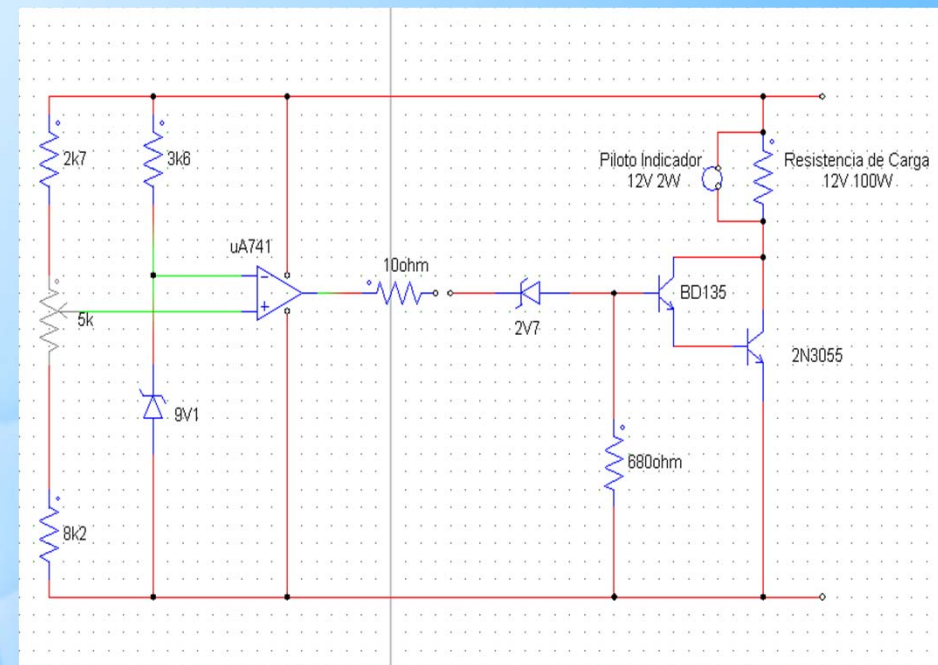
Circuitos de Protección de las baterías.

Para alargar la vida de las baterías se incorporarán los siguientes circuitos.

Circuito Fin de Descarga.



Circuito Fin de Carga.



5. Conclusiones y Líneas Futuras.

- *1. Introducción*
- *2. Eólica y Torre*
- *3. Generador*
- *4. Instalación eléctrica*
- *5. Conclusiones y Líneas Futuras*
 - *Montaje*
 - *Presupuesto*

Presupuesto

COMPONENTES COMPRADOS	PRECIO (€)
Imanes	180
Cuadro Control	75,56
Inversor	117
Rectificador Trifásico	54,15
Pegamento Araldit Bi componente	15,3
Masilla	5,09
Otros: tornillos, tuercas, arandelas ...	35
COMPONENTES FABRICADOS	PRECIO (€)
Listones madera (palas)	13,50 x 3
Torneado y Fresado	200
TOTAL PRESUPUESTO 722,6 €	

Conclusiones

- Palas de 1,5 m para aprovechar los vientos medios de la ubicación.
- Orientación mediante veleta
- Sistema de frenado para protección con vientos altos
- Generador eléctrico de imanes permanentes:
 - Dimensionamiento de los imanes
 - Cálculo teórico y simulación por elementos finitos
 - Construcción utilizando un motor de jaula de ardilla de desguace
 - Ensayos experimentales
- Reductora mecánica para obtener la velocidad óptima en las palas
 - Resultados óptimos de operación (λ y C_p óptimos).
 - No requiere control.
 - Construcción sencilla.
- Rectificación de la tensión mediante puente de diodos.
- Almacenamiento en baterías de Plomo-ácido
- Cargas:
 - Continuas: Iluminación, directamente desde las baterías
 - Alternas: Mediante inversor para obtener tensión monofásica a 230 V 50 Hz

Líneas Futuras

- Sustitución de las palas por otras de fibra de vidrio.
- Rediseño del generador para evitar multiplicadora
- Mejoras en el control y frenado del aerogenerador.
- Incorporación de más baterías

Montaje Final



